

## System for actively reducing speed non-uniformities of IC engine drive-shaft

**Patent number:** DE19532163

**Publication date:** 1997-03-06

**Inventor:** MASBERG ULLRICH DR [DE]; PELS THOMAS [DE]; ZEYEN KLAUS-PETER [DE]; GRUENDL ANDREAS DR [DE]; HOFFMANN BERNHARD [DE]

**Applicant:** CLOUTH GUMMIWERKE AG [DE]

**Classification:**


- **International:** F16F15/18; B60L7/28; H02K49/02; H02P15/00; B60K28/16; B60T1/10; B60T8/32

- **European:** B60K6/04B4; B60K6/04D2; B60K6/04D4; B60K6/04D12; B60K6/04D14; B60K6/04F; B60K6/04H4B; B60K6/04H6; B60K6/06; B60K28/16; B60L7/28; B60T1/10; F02B75/06; F16F15/129A; F16F15/18; H02K7/108; H02K51/00

**Application number:** DE19951032163 19950831

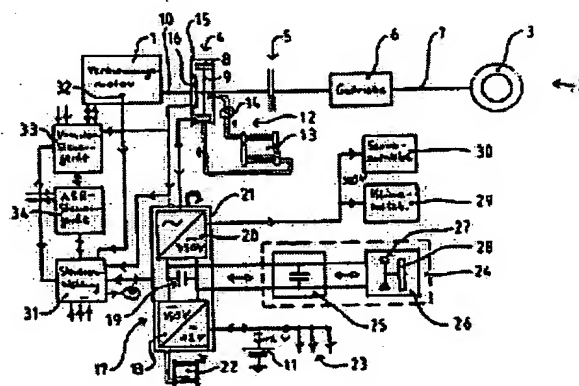
**Priority number(s):** DE19951032163 19950831; DE19951049259 19950831

**Also published as:**

 DE19549259 (A1)

### Abstract of DE19532163

The system for actively reducing speed variations in the drive-shaft of an IC engine (1) has at least one single or three-phase electrical machine (4) coupled to the shaft and at least one inverter to supply the excitation voltage at variable frequency, amplitude and/or phase, plus a control unit for it. The electrical machine gives a rapidly alternating torque, this being a braking torque for positive driveshaft speed non-uniformity and a driving torque for negative speed inequality. In other words, it superimposes a negative or positive torque on to the driveshaft. Recovered energy in the braking mode is stored and re-used.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



⑦1 Anmelder:  
Clouth Gummiwerke AG, 50733 Köln, DE

⑦4 Vertreter:  
von Samson-Himmelstjerna und Kollegen, 80538  
München

⑥2 Teil in: P 195 49 259.5

⑦2 Erfinder:  
Masberg, Ullrich, Dr., 51503 Rösrath, DE; Pels,  
Thomas, 48359 Heiden, DE; Zeyen, Klaus-Peter,  
50670 Köln, DE; Gründl, Andreas, Dr., 81377  
München, DE; Hoffmann, Bernhard, 82319  
Starnberg, DE

⑥6 Entgegenhaltungen:

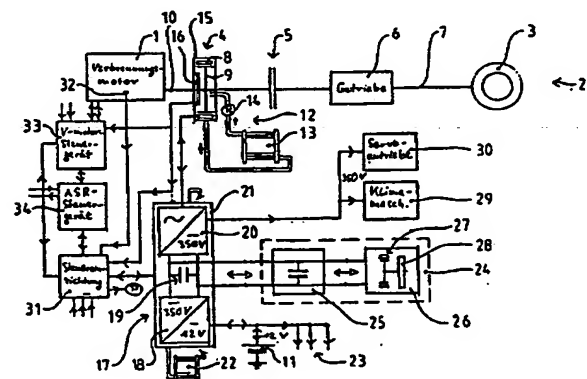
DE	44 08 719 C1
DE	42 30 510 C1
DE-PS	9 38 680
DE-PS	2 82 671
DE	44 23 577 A1
DE	38 14 484 A1
DE	33 38 548 A1
DE	33 35 923 A1
DE	32 43 513 A1
US	27 90 917
EP	06 04 979 A2
EP	04 37 266 A2

DEISENROTH, Hans, TRABERT, Christoph:  
Vermeidung von Überspannungen bei  
Pulsrichterantrieben. In: etz, Bd. 114, 1993, H. 17,  
S. 1060-1067;  
LANGHEIM, J., FETZ, J.: Electric Citybus with two  
Induction Motors - Power Electronics and Motor  
Control. In: ETEP Vol. 2, No. 6, Nov./Dec. 1992,  
S. 359-365;  
GEISLER, W., UNGER-WEBER, F.: Modelling The  
Three Phase Propulsion System Of A Modern  
Multisystem-Locomotive. In: EPE Firenze, 1991,  
S. 4-632 - 4-637;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten einer Welle, insbesondere der Triebwelle  
eines Verbrennungsmotors, und Verfahren hierzu

⑤7 Die Erfindung betrifft ein System zur aktiven Verringerung  
von Drehungleichförmigkeiten einer Welle, insbesondere der  
Triebwelle (10) eines Verbrennungsmotors (1), mit wenig-  
stens einer elektrischen Maschine (4), insbesondere Dreh-  
oder Wanderfeldmaschine, die mit der Welle gekoppelt oder  
koppelbar ist; wenigstens einem Wechselrichter (17) zum  
Erzeugen der für die magnetischen Felder der Maschine (4)  
benötigten Spannungen und/oder Ströme variabler Fre-  
quenz, Amplitude und/oder Phase; und wenigstens einer  
Steuereinrichtung (31), die den Wechselrichter (17) und  
damit die elektrische Maschine (4) so steuert, daß diese  
positiven und negativen Drehungleichförmigkeiten der Welle  
entgegenwirkt. Die Erfindung ist auch auf ein Verfahren zur  
aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten gerich-  
tet.



Die Erfindung betrifft ein System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten einer Welle, insbesondere der Triebwelle eines Verbrennungsmotors.

Bekannt sind einfachere Systeme dieser Art, die zur Verringerung von Drehungleichförmigkeiten eines Verbrennungsmotors auf diesen entweder nur antreibend oder nur bremsend wirken können. So offenbaren Patent Abstracts of Japan, Band 11, Nr. 28 (M-557), 27. Januar 1987 & JP-A-61 200 333 (NISSAN I) eine elektrische Synchronmaschine, die direkt mit der Kurbelwelle eines Verbrennungsmotors gekoppelt ist und bei Unterschreiten eines gewissen Standardwerts der Drehzahl als (antreibender) elektrischer Motor geschaltet wird und so einer Drehungleichförmigkeit zum Langsamen hin (einer sog. negativen Drehungleichförmigkeit) entgegenwirkt. Wenn die Drehzahl diesen Standardwert überschreitet, wird der Motor abgeschaltet.

Ein nur bremsend wirkendes System offenbaren Patent Abstracts of Japan, Band 4, Nr. 29 (M-002), 14. März 1980 & JP-A-55 005 454 (TOYOTA). Hier umgreift ein Elektromagnet den äußeren Rand einer Schwungscheibe auf der Kurbelwelle eines Verbrennungsmotors. Synchron mit Drehungleichförmigkeiten wird der Elektromagnet erregt und bremsst so die Schwungscheibe phasenrichtig nach Art einer Wirbelstrombremse.

Ähnlich offenbart EP-B-0 427 568 (ISUZU) einen Verbrennungsmotor mit einer herkömmlichen riemengetriebenen Lichtmaschine, die bei Vorliegen einer Drehungleichförmigkeit zum Schnellen hin (einer sog. positiven Drehungleichförmigkeit) bremsend wirkt.

Schließlich offenbart auch DE-A-32 30 607 (VW) einen Verbrennungsmotor mit einer Schwungrad-Lichtmaschine, die bei Vorliegen einer Drehungleichförmigkeit während Phasen positiver Ungleichförmigkeit bremsend wirkt. Die Lichtmaschine kann auch als Starter für den Verbrennungsmotor dienen.

Auch Systeme, die zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten abwechselnd antreibend und bremsend wirken können, sind im Stand der Technik bekannt:

So offenbart EP-B-0 175 952 (MAZDA) ein solches System mit einer Stromwendermaschine, die zwei Ständerwicklungen — eine zum Antreiben und eine zum Bremsen — hat. Durch abwechselndes phasenrichtiges Erregen dieser beiden Ständerwicklungen wirkt die Maschine abwechselnd antreibend und bremsend.

Patent Abstracts of Japan, Band 7, Nr. 240 (M-251), 25. Oktober 1983 & JP-A-58 126 434 (NISSAN II) offenbaren ein System mit einer Stromwendermaschine, wobei hier die beim Bremsen gewonnene elektrische Energie in einem Kondensator zwischengespeichert und zum Antreiben wieder verwendet wird.

DE-A-41 00 937 (FICHTEL & SACHS) offenbart ein System mit einer Wechselstrom-Synchronmaschine, die ein Drehmoment mit periodisch wechselnder Richtung erzeugen kann. Die Synchronmaschine ist so ausgebildet, daß die Drehmomentschwankungen in einer festen Phasenlage relativ zur Kurbelwelle auftreten, um so bestimmten Drehungleichförmigkeiten-Ordnungen des Verbrennungsmotors entgegenwirken zu können. Um dennoch eine gewisse Verstellung dieser festen Phasenbeziehung zu ermöglichen, kann die Ständer-Wicklungsanordnung der Synchronmaschine mehrere in Umfangsrichtung gegeneinander versetzte Wicklungsstränge aufweisen, die wahlweise mit Strom beaufschlagt werden können.

Diese bekannten Systeme ermöglichen grundsätzlich eine aktive Verringerung von Drehungleichförmigkeiten.

Die Erfindung geht von dem technischen Problem aus, derartige Systeme weiterzubilden und insbesondere ein System mit hoher Variabilität gegenüber verschiedenartigen Drehungleichförmigkeiten und unterschiedlichen Betriebszuständen z. B. des Verbrennungsmotors anzugeben.

Sie löst dieses Problem mit einem System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten einer Welle, insbesondere der Triebwelle eines Verbrennungsmotors, mit

- wenigstens einer elektrischen Maschine, insbesondere Dreh- oder Wanderfeldmaschine, die mit der Welle gekoppelt oder koppelbar ist;
- wenigstens einem Wechselrichter zum Erzeugen der für die magnetischen Felder der Maschine benötigten Spannungen und/oder Ströme variabler Frequenz, Amplitude und/oder Phase;
- wenigstens einer Steuereinrichtung, die den Wechselrichter und damit die elektrische Maschine so steuert, daß diese positiven und negativen Drehungleichförmigkeiten der Welle entgegenwirkt (Anspruch 1).

Bei den Drehungleichförmigkeiten kann es sich insbesondere um solche handeln, die bei einem Verbrennungsmotor, insbesondere einem Hubkolbenmotor mit innerer Verbrennung, durch die auf die Triebwelle (d. h. insbesondere die Kurbelwelle) wirkenden Gas- und Massenkräfte der einzelnen Hubkolben auftreten. Beispielsweise treten bei einem Vierzylinder-Viertaktmotor relativ große Drehungleichförmigkeiten in der zweiten Ordnung (d. h. dem zweifachen der Drehfrequenz des Motors) auf; entsprechend bei einem Sechszylinder-Viertaktmotor in der dritten Ordnung. Daneben gibt es Drehungleichförmigkeiten bei höheren Ordnungen sowie stochastisch auftretende Ungleichförmigkeiten. Bei dem Verbrennungsmotor kann es sich z. B. um einen Zweitakt- oder Viertaktmotor mit gerader Zylinderzahl (z. B. 2, 4, 8, 10, 12 Zylinder usw.) oder ungerader Zylinderzahl (1, 3, 5, 7, 9, 11 usw. Zylinder) handeln (der z. B. nach dem Otto- oder dem Dieselpinzipp arbeitet). Grundsätzlich kann es sich auch um einen andersartigen Verbrennungsmotor, wie z. B. einen Hubkolbenmotor mit äußerer Verbrennung (sog. Stirling-Motor) handeln. Eine andere Möglichkeit ist ein Kreiskolbenmotor (z. B. ein Wankelmotor), bei dem zumindest die Gaskräfte zu Drehungleichförmigkeiten führen können. Daneben kommen Turbinen, insbesondere Gas- oder Dampfturbinen in Frage. Bei ihnen sind die Drehungleichförmigkeiten im allgemeinen zwar nur klein; für Anwendungen, bei denen es auf besonders guten Rundlauf ankommt, kann auch bei ihnen das erfindungsgemäße System äußerst vorteilhaft sein.

Das erfindungsgemäße System ist aber nicht nur geeignet zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten, welche von einem Antriebsaggregat (z. B. eines Kraftfahrzeugs, Schienenfahrzeugs oder Schiffes) herrühren, wie es in den o.g. Beispielen der Fall ist. Es kann sich vielmehr auch um Drehungleichförmigkeiten handeln, die in einem Antriebsstrang — also zwischen dem Antriebsaggregat und dem Abtriebspunkt entstehen, etwa durch Kardangelenke, räumliche Wellenschwingungen oder Getriebeverschleiß. Das erfindungsgemäße System erlaubt es, auch derartige Dre-

hungleichförmigkeiten effektiv zu verringern.

Ein Antriebssystem könnte auch mit mehreren erfindungsgemäßen Systemen zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten ausgerüstet sein, z. B. könnte bei einem Kraftfahrzeug ein erstes System direkt auf die Kurbelwelle des Antriebsaggregats (Verbrennungsmotors) wirken, während ein zweites System abwärts der Kupplung, z. B. zwischen Kupplung und Getriebe zum Verringern von Drehungleichförmigkeiten des Triebstrangs dient.

Eine "elektrische Maschine" ist jede Art von Maschine für Rotationsbewegungen, die sowohl als elektrischer Motor wie auch als elektrische Bremse, ggf. als Generator betrieben werden kann. Unter "Drehfeldmaschine" wird — im Gegensatz zu einer Stromwendermaschine — eine Maschine verstanden, in der ein magnetisches Drehfeld auftritt. Hierbei kann es sich z. B. um eine Asynchron- oder Synchronmaschine, insbesondere für Dreiphasenstrom, oder um eine Maschine mit elektronischer Kommutierung handeln. Bei einer Drehfeldmaschine überstreicht das magnetische Feld einen vollen 360°-Grad-Umlauf, bei einer Wanderfeldmaschine hingegen nur einen oder mehrere Ausschnitte hiervon. Bei der Wanderfeldmaschine kann es sich also z. B. um eine Asynchron- oder Synchronmaschine handeln, deren Ständer sich nur über einen oder mehrere Sektoren des Läufers erstreckt — ähnlich einem bzw. mehreren gekrümmten Linearmotor(en).

Grundsätzlich kann die Kopplung der elektrischen Maschine mit der Welle mittelbar sein, z. B. über ein Getriebe. Vorzugsweise handelt es sich jedoch um eine direkte Kopplung, bei der z. B. der Läufer der elektrischen Maschine — ähnlich einem Schwungrad — unmittelbar auf der Welle oder einer ggf. koppelbaren Verlängerung der Welle sitzt.

Der Wechselrichter kann die für die magnetischen Felder (insb. Dreh- bzw. Wanderfelder) benötigten Spannungen und/oder Ströme mit (innerhalb gewisser Grenzen) frei wählbarer Frequenz, Amplitude oder Phase oder beliebiger Kombinationen dieser Größen erzeugen. Er kann dies vorteilhaft mit Hilfe elektronischer Schalter aus einer vorgegebenen Gleich- oder Wechselspannung oder einem vorgegebenen Gleich- oder Wechselstrom tun. Besonders vorteilhaft sind alle drei Größen — Frequenz, Amplitude und Phase — frei wählbar.

Insgesamt hat das erfindungsgemäße System mit seinem Wechselrichterantrieb den Vorteil, mit hoher Variabilität bei unterschiedlichsten Betriebszuständen und verschiedenartigsten Drehungleichförmigkeiten diese effektiv verringern und in vielen Fällen praktisch vollständig unterdrücken zu können und einfach eine ggf. gewünschte Überlagerung eines Zusatz-Drehmoments mit gewünschter Stärke herbeiführen zu können.

Die Steuereinrichtung steuert den Wechselrichter vorzugsweise so, daß die elektrische Maschine zur Drehungleichförmigkeits-Verringerung ein schnell alternierendes, und zwar bei einer positiven Drehungleichförmigkeit ein bremsendes und bei einer negativen Drehungleichförmigkeit ein antreibendes Drehmoment erzeugt, dem sie vorteilhaft zur zusätzlichen Erzielung einer antreibenden Wirkung oder einer bremsenden oder generatorischen Wirkung zumindest zeitweise ein positives bzw. negatives Drehmoment überlagern kann (Anspruch 2). Bei Ausgestaltungen, bei denen die elektrische Maschine außerdem als elektromagnetische Kupplung wirkt, kann an die Stelle des schnell alternierend bremsenden und antreibenden Drehmoments ein

schnell variierend größerer und kleinerer Kupplungsschlupf treten.

Unter einer "schnellen Variation" wird eine Variation im Frequenzbereich der zu verringernden Drehungleichförmigkeiten verstanden, also z. B. bei der Drehungleichförmigkeit der 2. Ordnung und bei einer Drehzahl von 3000 U/min (in neuerer Einheit ausgedrückt  $\text{min}^{-1}$ ) eine Variation mit einer Frequenz von 100 Hz. Demgegenüber variiert das ggf. überlagerte Zusatz-Drehmoment — abgesehen von möglicherweise steilen Flanken am Anfang oder Ende der Überlagerung — im allgemeinen langsam oder ist konstant.

Durch die (insbesondere additive) Überlagerung des Zusatz-Drehmoments in der gewünschten Richtung und Stärke sind die Drehungleichförmigkeits-Verringerung und die Zusatz-Drehmomenterzeugung voneinander entkoppelt. Das schnell variierende Drehmoment wird in seinem Verlauf durch die Überlagerung praktisch nicht verändert, nur gegenüber der Nulllinie verschoben. Ausnahmsweise verändert sich das schnell variierende Drehmoment nur dann, falls der Verbrennungsmotor aufgrund der mit der Zuschaltung des Zusatz-Drehmoments einhergehenden Laständerung tatsächlich geänderte Drehungleichförmigkeiten zeigt.

Falls das momentan gelieferte Zusatz-Drehmoment kleiner als die momentane Amplitude des Wechsel-Drehmoments ist, zeigt das Gesamt-Drehmoment der elektrischen Maschine — wenn auch gegenüber der Nulllinie verschoben — abwechselnd positive und negative Werte. Falls es hingegen größer ist, ist das Gesamt-Drehmoment nur positiv oder negativ, wobei dessen Betrag einen schnell variierenden Anteil enthält. Ein bremsendes Zusatz-Drehmoment kann dazu dienen, daß die elektrische Maschine den Kupplungsschlupf verringert, eine bremsende Synchronisier-Funktion ausübt, als Generator zur Stromversorgung fungiert und/oder eine Bremsung des Fahrzeugs herbeiführt oder unterstützt und/oder etwa im Rahmen einer Anti-Schlupf-Regelung durch Bremsen den Schlupf eines Antriebsrads verringert. Die bei Anwenden dieser Bremsfunktionen generatorisch gewonnene Bremsenergie (Zusatzdrehmoment-Bremsenergie) kann — wie die von Drehungleichförmigkeiten herrührende — gespeichert werden (z. B. in einem elektrischen Speicher oder in einem Schwungradspeicher) und als Antriebsenergie wiederverwendet oder in ein Netz oder z. B. die Fahrzeugbatterie eingespeist werden. Ein antreibendes Zusatz-Drehmoment kann einer beschleunigenden Synchronisierfunktion dienen oder eine Beschleunigung des Fahrzeugs unterstützen (die elektrische Maschine wirkt dann als "Booster") oder herbeiführen, beispielsweise um Beschleunigungslöcher, etwa bei einem Turboladern-Motor, zu füllen.

Um einen möglichst hohen Gesamtwirkungsgrad des Systems zu erzielen, wird vorteilhaft die beim Verringern einer positiven Drehungleichförmigkeit gewonnene Energie (Drehungleichförmigkeits-Bremsenergie) sowie ggf. die bei bremsendem Zusatz-Drehmoment gewonnene Energie (Zusatzdrehmoment-Bremsenergie) wenigstens teilweise gespeichert und die gespeicherte Drehungleichförmigkeits-Bremsenergie wird wenigstens teilweise zum Verringern einer negativen Drehungleichförmigkeit wiederverwendet (Anspruch 3).

Die Speicherung der Drehungleichförmigkeits-Bremsenergie sowie ggf. der Zusatzdrehmoment-Bremsenergie kann insbesondere durch die beiden folgenden Ausgestaltungen des Systems, nämlich durch einen elektrischen Speicher oder einen mechanischen

Speicher (Schwungradspeicher) und auch eine Kombination von beiden erfolgen:

Bei der ersten Ausgestaltung ist der Wechselrichter ein Zwischenkreis-Wechselrichter, dessen Zwischenkreis wenigstens einen elektrischen Speicher für Bremsenergie aufweist oder mit wenigstens einem solchen gekoppelt ist (Anspruch 4). Bei dem Speicher kann es sich insbesondere um eine Kapazität, eine Induktivität und/oder eine (schnelle) Batterie handeln. Er kann entweder ausschließlich der Speicherung von Bremsenergie dienen (in diesem Fall wäre er i.a. zusätzlich zu einem üblicherweise vorhandenen Zwischenkreis-Speicher geschaltet, welcher die beim Wechselrichter-Taktbetrieb erforderlichen Spannungs- bzw. Stromimpulse liefern kann), oder er kann nur teilweise der Speicherung der Bremsenergie dienen, also noch andere Energie — etwa die zum Taktbetrieb nötige — speichern (im letzteren Fall könnte er mit dem üblichen Zwischenkreis-Speicher zusammenfallen). Im übrigen kann die Ausbildung des Stromrichters als Zwischenkreis-Stromrichter in jedem Fall — z. B. auch ohne Zwischenspeicherung von Bremsenergie — vorteilhaft sein.

Unter einem "Zwischenkreis" versteht man einen Kreis, welcher im wesentlichen Gleichspannung bzw. -strom liefern kann, aus der ein nachgeschalteter Wechselrichter-Teil (der sog. Maschinen-Wechselrichter) durch Pulsen oder Takten variable Wechselspannungen bzw. -ströme bilden kann. Diese Gleichspannung bzw. dieser Gleichstrom muß i.a. besonderen Anforderungen genügen, welche beispielsweise von einer Fahrzeugbatterie kaum erbracht werden könnten: Beispielsweise muß bei einem Spannungszwischenkreis-Wechselrichter der Zwischenkreis Spannungsimpulse mit extremer Flankensteilheit und auf hohem Spannungsniveau bereitstellen. Eine Fahrzeugbatterie ist hierzu i.a. zu langsam und liefert zu niedrige Spannung. Im allgemeinen umfaßt ein Zwischenkreis-Wechselrichter drei Baugruppen, und zwar eine Eingangsbaugruppe zur Versorgung mit bzw. Abfuhr von elektrischer Energie, eine Ausgangsbaugruppe in Form des Maschinen-Wechselrichters und den dazwischenliegenden Zwischenkreis. Da bei dem System zur Drehungleichförmigkeits-Verringerung elektrische Energie auch über den Maschinen-Stromrichter gewonnen und nach Zwischenspeicherung wieder über diesen abgeführt werden kann, kann der Wechselrichter im Prinzip auch autark d. h. ohne Eingangsbaugruppe arbeiten. Der Begriff "Zwischenkreis" bezeichnet auch in diesem Fall — obwohl der Kreis dann nicht mehr zwischen zwei Baugruppen liegt — den Kreis mit der o.g. Funktion, Gleichspannung bzw. -strom für den Maschinen-Wechselrichter bereitzustellen.

Bei der weiteren Ausgestaltung dient ein Schwungrad zur Speicherung der Bremsenergie (Anspruch 5). Vorzugsweise ist das Schwungrad elektrisch über eine elektrische Maschine mit dem System gekoppelt. Hierbei kann es sich z. B. um eine von einem eigenen Stromrichter gesteuerte Drehfeld- oder Stromwendermaschine handeln. Beide Stromrichter können vorteilhaft jeweils in ihrem Zwischenkreis elektrisch miteinander gekoppelt sein. Die elektrische Maschine zur Drehungleichförmigkeits-Verringerung und die Schwungrad-Maschine arbeiten im Gegentakt: Wenn erstere bremsend wirkt, beschleunigt zweitere das Schwungrad bzw. wenn erstere antreibend oder weniger bremsend wirkt, bremst zweitere das Schwungrad. Da mit einem solchen Schwungrad-Energiespeicher relativ hohe Energiedichten gespeichert werden können, ist seine Verwendung

insbesondere dann vorteilhaft, wenn Anfahrkupplungsschlupf-Energie gespeichert werden soll oder wenn Drehungleichförmigkeiten mit relativ großem Energiegehalt vorliegen, wie es z. B. bei einem Dreizylinder-Viertakt-Dieselmotor der Fall sein kann. Der Schwungrad-Energiespeicher kann auch mit dem o.g. elektrischen Speicher kombiniert werden.

Aufgrund der hohen Variabilität der wechselrichter-gesteuerten elektrischen Maschine kann diese neben der aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten gleichzeitig oder zeitlich versetzt auch andere Funktionen ausführen und so herkömmlicherweise auf diese Funktionen spezialisierte Maschinen ersetzen. Insbesondere kann sie außerdem die Funktion eines Starters, z. B. für einen mit der Welle gekoppelten Verbrennungsmotor, und/oder die Funktion eines Generators zur Stromversorgung, z. B. zur Ladung einer Batterie oder Speisung eines Bordnetzes, haben (Ansprüche 6 und 7). Während des Startvorgangs ist i.a. keine Drehungleichförmigkeits-Verringerung erforderlich; hierzu wird die elektrische Maschine vorübergehend als reiner Elektromotor betrieben. Die Generatorfunktion ist hingegen i.a. auch während der Drehungleichförmigkeits-Verringerung erwünscht. Durch Überlagerung des schnell variierenden Moments mit einem gleichförmig bremsenden Moment erreicht man im zeitlichen Mittel einen Gewinn elektrischer Energie.

In entsprechender Weise kann die elektrische Maschine auch als Zusatzfunktion ein Beschleunigen und/oder Abbremsen der Welle herbeiführen oder unterstützen (Anspruch 8). Beispielsweise kann dies der Beschleunigung eines Kraftfahrzeugs zusammen mit dem Antriebsaggregat dienen. Zum Abbremsen eines Fahrzeugs kann die elektrische Maschine als verschleißfreie, ggf. generatorische Bremse oder Zusatzbremse dienen. Im Zusammenhang mit einer Anti-Schlupf-Regelung kann die elektrische Maschine durch Bremsen schnell das Gesamt-Antriebsmoment und damit den Schlupf eines oder mehrerer Antriebsräder verringern. Bei elektromagnetischer Kupplungsfunktion kann der Antriebsrad-Schlupf statt durch Bremsen auch durch Vergrößern des Kupplungs-Schlupfes verringert werden. Es ist möglich, während der Ausführung dieser Zusatzfunktionen die Drehungleichförmigkeits-Verringerungsfunktion auszuschalten oder beide Funktionen gleichzeitig auszuführen, etwa — wie oben erläutert — durch Überlagern eines entsprechenden antreibenden bzw. bremsenden Moments.

Die bei Anwenden dieser Zusatzfunktionen gewonnene Bremsenergie kann — wie die von Drehungleichförmigkeiten herrührende — gespeichert werden (z. B. im elektrischen Speicher oder im Schwungradspeicher) und als Antriebsenergie wiederverwendet oder in ein Netz oder z. B. die Fahrzeugbatterie eingespeist werden. Um bei der Fahrzeugbremsung mit Hilfe der elektrischen Maschine einen möglichst hohen Wirkungsgrad der Bremsenergie-Rückgewinnung zu erzielen, trennt man beim Bremsen vorteilhaft die elektrische Maschine vom Antriebsaggregat mit Hilfe einer dazwischengeschalteten, z. B. mechanischen Kupplung.

Bei herkömmlichen Kraftfahrzeugen, anderen Fahrzeugen und auch stationären Antriebsaggregaten gibt es häufig Hilfsmaschinen, welche — da sie relativ hohe Leistung aufnehmen — mechanisch vom Antriebsaggregat angetrieben werden, z. B. über Riemengetriebe. Hierbei kann es sich z. B. um Klimamaschinen, Servoantriebe, Pumpen oder ähnliches handeln. Eine derartige mechanische Antriebskopplung ist i.a. nicht optimal, da

die Hilfsmaschine dem Antriebsaggregat durch die von ihm vorgegebenen Drehzahl-Zustände folgen muß. Sie läuft damit einerseits nicht konstant bei ihrer optimalen Drehzahl und muß andererseits auch dann laufen, wenn dies mangels abgefragter Hilfsleistung gar nicht nötig wäre. Um diese Nachteile zu überwinden, ist es vorteilhaft, daß die elektrische Maschine Strom auf relativ hohem Spannungsniveau, vorzugsweise höher als 100 Volt, besonders vorzugsweise im Bereich von 250—450 Volt liefert, und Hilfsmaschinen elektrisch auf diesem hohen Spannungsniveau angetrieben werden (Anspruch 9). Ein derart hohes Spannungsniveau kann insbesondere bei einem Zwischenkreis-Wechselrichter im Zwischenkreis bereits vorliegen, und braucht so nicht besonders für diesen Zusatzzweck erzeugt werden. Ein elektrischer statt eines mechanischen Hilfsmaschinen-Antriebs ist deshalb möglich, da aus dem hohen Spannungsniveau relativ kleine Ströme resultieren (im Gegensatz etwa zu dem 12-Volt-Spannungsniveau eines herkömmlichen Kraftfahrzeugnetzes). Elektrisch angetrieben kann man die Hilfsmaschinen im Bedarfsfall bei ihrer optimalen Drehzahl laufen lassen und ansonsten abschalten. Man erreicht so eine deutliche Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades.

Die aktive Verringerung von Drehungleichförmigkeiten beruht — wie gesagt — darauf, daß die elektrische Maschine positiven und negativen Drehungleichförmigkeiten entgegenwirkt, also z. B. bei positiven Drehungleichförmigkeiten bremsend und bei negativen antreibend wirkt. Hierfür benötigt die Steuereinrichtung Information über den Zeitpunkt und ggf. den Betrag einer positiven bzw. negativen Drehungleichförmigkeit.

Eine Möglichkeit, diese Information zu erhalten, liegt in einer Messung der momentanen Drehungleichförmigkeit oder einer anderen, mit ihr gekoppelten Größe. Beruht der Betrieb der elektrischen Maschine auf dieser Information, so handelt es sich um eine (rückgekoppelte) Regelung, da das tatsächliche Vorliegen einer Drehungleichförmigkeit zu einer unmittelbaren Rückwirkung auf diese Drehungleichförmigkeit führt.

Als andere Möglichkeit verwendet man als Information für den Betrieb der elektrischen Maschine nicht die tatsächliche, sondern eine erwartete Drehungleichförmigkeit. Es handelt sich hierbei also um eine (nicht-rückgekoppelte) Steuerung. Beispielsweise kann man bei einem Verbrennungsmotor Betrag und Vorzeichen der momentanen Drehungleichförmigkeit als Funktion des (Kurbel)-Wellenwinkels und eines oder weiterer Betriebsparameter (z. B. Drehzahl und Drosselklappenstellung) einmal an einem Prototyp bestimmen bzw. per Rechner simulieren und mit dieser Information, gespeichert in Form eines Kennfeldes, jeden Serien-Verbrennungsmotor ausrüsten. Im Betrieb mißt das System dann den momentan vorliegenden Kurbelwellenwinkel und die weiteren Betriebsparameter (z. B. Drehzahl und Drosselklappenstellung), liest die dazugehörigen gespeicherten Kennfeldwerte für Betrag und Amplitude der erwarteten Drehungleichförmigkeit, und steuert über die Steuereinrichtung die elektrische Maschine entsprechend, um der Drehungleichförmigkeit entgegenzuwirken.

Möglich ist außerdem eine adaptive Steuerung, d. h. eine (nicht-rückgekoppelte) Steuerung, bei der die Steuereinrichtung jedoch nicht feststehend ist, sondern durch Messung zeitlich vorausgehender Drehungleichförmigkeiten definiert oder zumindest modifiziert wird.

Möglich sind ferner Mischformen der genannten Arten, z. B. können die in einem Kennfeld gespeicherten

Erwartungswerte bezüglich einer erwarteten Größe adaptiv sein (z. B. bezüglich der Amplitude), während sie bezüglich einer anderen erwarteten Größe (z. B. Wellenwinkel) feststehend sein könnten. Entsprechend läßt sich auch Regelung und Steuerung kombinieren, etwa indem der Wellenwinkel als Erwartungswert aus einem Kennfeld entnommen wird, während die Amplitudeninformation aus einer Messung der momentanen Drehungleichförmigkeit abgeleitet wird. Eine sehr vorteilhafte Kombination ist auch eine Regelung mit Vorsteuerung, bei der z. B. in jedem Regelintervall die Regelung zunächst entsprechend einem erwarteten Drehungleichförmigkeitswert aus einem Kennfeld voreingestellt wird (Vorsteuerung) und anschließend die i. a. kleineren Abweichungen des tatsächlichen (Werts zum voreingestellten Wert nachgeregelt werden (Regelung). Diese Steuerart liefert bei relativ geringem Aufwand ein sehr schnelles und genaues Regelverhalten. Es kann auch vorteilhaft sein, bei niedrigen Drehzahlen (z. B. im Leerlauf) mit (rückgekoppelter) Regelung zu arbeiten, dagegen bei höheren Drehzahlen zu (nicht-rückgekoppelter) Steuerung überzugehen (Anspruch 10).

Jede dieser verschiedenen Steuerarten hat ihre Vor- und Nachteile: Eine Kennfeldsteuerung ist besonders einfach, erlaubt aber keine Anpassung etwa an produktions- oder verschleißbedingte Streuungen der Drehungleichförmigkeits-Charakteristik und darüberhinaus auch keine Verringerung von stochastischen Drehungleichförmigkeiten. Eine Regelung hat diese letztgenannten Nachteile nicht, stellt aber hohe Anforderungen an die Geschwindigkeit der Meßwerterfassung und -Verarbeitung; auch muß sie Stabilitätsbedingungen genügen. Eine adaptive Steuerung und Mischformen der Steuerarten können die Vorteile von Regelung und Steuerung vereinen.

Bei Regelung, adaptiver Steuerung und entsprechenden Mischformen muß die Meßgröße nicht unmittelbar die Drehungleichförmigkeit (ggf. abgeleitet aus einer Messung der Winkellage oder -geschwindigkeit als Funktion der Zeit) sein. Es kann sich vielmehr auch um eine (oder mehrere) andere Größe(n) handeln, die einen Schluß auf zumindest einen Teil der auftretenden Drehungleichförmigkeiten erlaubt (erlauben). Bei einem Verbrennungsmotor kann diese Größe vorteilhaft der Gasdruck in einem oder mehreren Motorzylindern sein. Der Gasdruck ist nämlich eine wesentliche, veränderliche Quelle der Drehungleichförmigkeiten. Außerdem zu berücksichtigen ist eine andere wesentliche, praktisch unveränderliche Quelle — die Massenkräfte. Ihr Beitrag kann in einem Kennfeld fest gespeichert sein. Alternativ (oder ergänzend) kann das momentane Drehmoment des Verbrennungsmotors, z. B. mit Hilfe einer Drehmomentnabe gemessen werden. Die Verwendung des Gasdruckes und/oder des momentanen Drehmoments als Meßgröße erlaubt somit eine relativ einfache und schnelle Regelung, adaptive Steuerung oder entsprechende Mischform (Anspruch 11).

In Fällen, bei denen auf die Welle auch Radialkräfte einwirken — wie bei einem Hubkolbenmotor — wird die Welle neben Drehungleichförmigkeiten i. a. auch zu Radialschwingungen angeregt. Es ist daher vorteilhaft, daß die elektrische Maschine einen Feldsektor aufweist oder mehrere Feldsektoren mit wenigstens teilweise unabhängig steuerbaren Wanderfeldern aufweist, wobei das bzw. die Wanderfeld(er) in dem (den) Feldsektor(en) so gesteuert ist (sind), daß die elektrische Maschine neben Drehungleichförmigkeiten auch Radialschwingungen der Welle verringert (Anspruch 12). Hierzu folgen-



de Erläuterung: Bei einer kreisförmig geschlossenen (360°-) Drehfeldmaschine heben sich die auf die Welle wirkenden magnetischen Kräfte aus Symmetriegründen auf, so daß resultierend nur Drehmomente verbleiben. Erstreckt sich das magnetische Feld hingegen nur über einen Sektor (d. h. über weniger als 360°), so ruft das Feld neben einem Drehmoment im allgemeinen auch eine Kraft mit wenigstens einer Komponente in Radialrichtung der Welle hervor. Mit einer Sektormaschine können daher außer dem Radialschwingungen verringert werden. Hierzu wird die elektrische Maschine so gesteuert, daß die in Radialrichtung wirkende magnetische Kraft der momentan ablaufenden Radialschwingungs-Auslenkung entgegengesetzt ist. Mit einem einzigen Feldsektor ist eine gleichzeitige Verringerung von Drehungleichförmigkeiten und Radialschwingungen i. a. nur angenähert möglich. Eine noch bessere Wirkung erzielt man mit mehreren unabhängig steuerbaren Wanderfeldern (z. B. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 usw.). Selbstverständlich können die mehreren Feldsektoren räumlich in einen kreisförmig umlaufenden Ständer zusammengefaßt sein, wenn sie nur funktionell als Feldsektoren wirken und unabhängig steuerbar sind. Eine elektrische Maschine mit mehreren unabhängigen Feldsektoren kann man übrigens auch als mehrere elektrische Maschinen, die auf einen gemeinsamen Läufer wirken, auffassen.

Alternativ zur Verwendung einer elektrischen Maschine mit unabhängigen Feldsektoren kann das System auch wenigstens einen Aktuator aufweisen, der Radialkräfte auf die Welle ausüben kann und so gesteuert ist, daß er Radialschwingungen der Welle entgegenwirkt (Anspruch 13). Der Aktuator kann z. B. die Form mehrerer Elektromagnete oder piezoelektrischer Steller haben, die gegenphasig zur Radialschwingung auf die Welle wirken.

Um Radial-Resonanzschwingungen der Welle aus dem Betriebs Drehzahlbereich herauszuverlegen, kann der Läufer der elektrischen Maschine vorteilhaft als passiver Schwingungstilger ausgebildet sein oder es kann ihr ein solcher parallel geschaltet sein.

Die elektrische Drehfeldmaschine bzw. Wanderfeldmaschine (oder Linearmaschine) des Systems ist vorzugsweise eine Asynchronmaschine, eine Synchronmaschine oder eine Reluktanzmaschine, insbesondere für Drei-Phasen-Strom (Anspruch 14). Eine Asynchronmaschine hat i. a. einen relativ einfach aufgebauten Läufer (i. a. einen Läufer mit Kurzschlußwicklungen oder Wicklungen, deren Enden an Schleifringe geführt sind) und weist daher hinsichtlich der Erstellungskosten und der mechanischen Belastbarkeit Vorteile auf. Sie ist jedoch steuerungstechnisch relativ kompliziert, da Betrag und Phasenwinkel des Läuferstromes lastabhängig, aber nicht direkt über Ständergrößen meßbar sind. Für eine Einstellung eines bestimmten Drehmoments ist jedoch eine Kenntnis des Läuferstromes nötig. Hingegen haben Synchronmaschinen (sie haben Läufer mit ausgeprägten Polen, die über Permanentmagnete oder Strom erregt werden) im allgemeinen höhere Erstellungskosten. Sie sind andererseits steuerungstechnisch einfacher zu handhaben, da bei ihnen das Drehmoment im wesentlichen vom Läuferwinkel abhängt, der mit Hilfe eines Läuferlage-Gebers direkt meßbar ist. Bei denjenigen Ausgestaltungen des Systems, die von vornherein einen höheren Steueraufwand haben — wie etwa die oben erläuterte Maschine mit mehreren unabhängigen Feldsektoren — kann daher eine Synchronmaschine besonders vorteilhaft sein. Reluktanzmaschinen gehören im

weiteren Sinn zu den Synchronmaschinen.

Insbesondere bei der Asynchronmaschine erfolgt die Steuerung der elektrischen Maschine vorzugsweise auf der Grundlage einer feldorientierten Regelung (sog. Vektorregelung) (Anspruch 15). Hierbei wird, ausgehend von direkt meßbaren momentanen Größen, wie angelegte Spannung, Ständerstrom und ggf. Drehzahl, anhand eines rechnerischen dynamischen Maschinenmodells der Ständerstrom in eine drehmomentbildende Komponente, die mit dem Läuferfluß das Drehmoment erzeugt, und eine senkrecht dazu verlaufende, den Maschinenfluß erzeugende Komponente rechnerisch zerlegt und so das Drehmoment ermittelt. Diese Steuerungstechnik erlaubt es — obwohl die Stromverhältnisse im Läufer nicht direkt meßbar sind — ein gewünschtes Drehmoment mit hoher Genauigkeit einzustellen.

Bei dem System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten handelt es sich i. a. um ein Hilfsystem, das z. B. im Triebstrang eines Kraftfahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor als Hauptsystem angeordnet ist. Wegen seines Hilfs-Charakters sollte es relativ zum Hauptsystem wenig Raum beanspruchen, sollte also möglichst kompakt aufgebaut sein. Die im folgenden genannten vorteilhaften Maßnahmen dienen — neben anderen vorteilhaften Zwecken — einem solch kompakten Aufbau.

Eine Maßnahme zur Erzielung hoher Kompaktheit liegt darin, daß die elektrische Maschine eine feine Polteilung, insbesondere wenigstens einen Pol pro 45°-Ständerwinkel aufweist (Anspruch 16). Bei einer kreisförmig geschlossenen (360°-) Maschine entspricht dies einer Gesamtzahl von wenigstens acht Polen. Besonders vorteilhaft sind noch feinere Polteilungen, entsprechend z. B. 10, 12, 14, 16 oder mehr Polen bei der kreisförmig geschlossenen Maschine. Eine feine Polteilung erlaubt es nämlich, die Wickelköpfe des Ständers klein auszubilden, und zwar sowohl in Axial- wie auch in Umfangsrichtung der Maschine, so daß die Maschine in Axialrichtung insgesamt kürzer ausgebildet sein kann. Auch kann bei feinerer Polteilung der Ständerrücken für den magnetischen Rückfluß dünner (und damit auch leichter) ausgebildet sein, mit der Folge, daß bei gleichem Außendurchmesser der Maschine der Läufer einen größeren Durchmesser haben kann. Größerer Läuferdurchmesser führt wegen des in Umfangsrichtung längeren Luftspaltes und des größeren wirksamen Hebelarms zu einem größeren Drehmoment. Insgesamt führt somit eine feinere Polteilung zu einer kompakteren und leichteren Maschine. Daneben sind wegen der geringeren Wickeldrahtlänge — kleinere Wickelköpfe benötigen weniger nicht-aktiven Wicklungsdraht — die ohmschen Verluste geringer. Da ferner das Streufeld (das den Blindleistungsanteil wesentlich bestimmt) von der Wickelkopffläche abhängt, ist es bei feiner Polteilung relativ gering. Ein geringes Streufeld ist insbesondere bei der Drehungleichförmigkeits-Verringerung vorteilhaft, da hier — anders als bei einer üblichen elektrischen Maschine — dauernd zwischen Motor- und Generatorbetrieb hin- und hergewechselt wird und bei dem damit einhergehenden Umpolen laufend Blindleistung aufgebracht werden muß.

Bei schnell laufenden Drehfeld-Maschinen sind feine Polteilungen unüblich, da sie eine relativ hohe Polwechselfrequenz bedingen. Ein üblicher Wert für die Polwechselfrequenz beträgt beispielsweise 120 Hz. Die im Rahmen der Erfindung verwendete elektrische Maschine hat hingegen vorteilhaft eine hohe maximale Polwechselfrequenz, vorzugsweise zwischen 300 und



1600 Hz und mehr, besonders vorzugsweise zwischen 400 Hz und 1500 Hz (Anspruch 17).

Um den Einfluß von Wirbelströmen im Ständer — die mit steigender Polwechselfrequenz zunehmen — zu verringern, weist der Ständer vorteilhaft dünne Ständerbleche, vorzugsweise mit einer Dicke von 0,35 mm oder weniger, besonders vorzugsweise 0,25 mm oder weniger auf. Als weitere Maßnahme zur Verringerung der Verluste sind die Ständerbleche vorzugsweise aus einem Material mit niedrigen Ummagnetisierungsverlusten, insbesondere kleiner als 1 Watt/kg bei 50 Hz und 1 Tesla, gefertigt (Anspruch 18).

Als weitere Maßnahme, die zu einer kompakten Ausbildung beiträgt, weist die elektrische Maschine vorteilhaft eine innere Fluidkühlung auf (Anspruch 19). Bei dem Fluid kann es sich vorteilhaft um Öl handeln. Eine sehr effektive Kühltechnik besteht darin, die Maschine im Inneren ganz unter Öl zu setzen. Ein Nachteil hiervor ist jedoch, daß oberhalb ca. 500 U/min Turbulenzverluste auftreten, die oberhalb ca. 2000 U/min merkliche Ausmaße annehmen können. Um dem zu begegnen, erfolgt die Zufuhr des Kühlfluids vorteilhaft verlustleistungs- und/oder drehzahlabhängig, wobei es sich bei der Fluidkühlung vorzugsweise um eine Sprühfluidkühlung handelt. In der Maschine befindet sich dann immer nur im wesentlichen soviel Kühlfluid, wie momentan zur Abfuhr der Verlustleistung benötigt wird. Bei sehr hohen Verlustleistungen und/oder niedrigen Drehzahlen kann die ganze Maschine unter Öl gesetzt sein. Die Sprühfluidkühlung stellt eine besonders gute Verteilung des Fluids sicher.

Quantitativ läßt sich die Kompaktheit durch die Größe "Drehmomentdichte" ausdrücken. Vorzugsweise weist die elektrische Maschine eine hohe Drehmomentdichte — bezogen auf das maximale Drehmoment — auf, die besonders vorzugsweise größer als 0,01 Nm/cm<sup>3</sup> ist (Anspruch 20).

Wie oben ausgeführt wurde, können an einer Welle mit Drehungleichförmigkeiten oft auch Radialschwingungen auftreten, insbesondere bei Kurbelwellen von Verbrennungsmotoren. Um robust gegenüber Radialschwingungen zu sein, ist das System vorzugsweise so ausgebildet, daß die elektrische Maschine stark im Bereich magnetischer Sättigung arbeitet. Ein Maß für die magnetische Sättigung ist der Strombelag (bei maximalem Drehmoment) im Ständer pro cm Luftspaltlänge in Umfangsrichtung. Vorzugsweise beträgt dieses Maß wenigstens 400–1000 A/cm, besonders vorzugsweise wenigstens 500 A/cm (Anspruch 21). Das Arbeiten stark im Sättigungsbereich erlaubt es, die Maschine mit einem relativ weiten Luftspalt auszubilden. Änderungen des Luftspaltes — wie sie bei Radialschwingungen auftreten — wirken sich wegen des Betriebs im Sättigungsbereich kaum aus. Neben der Robustheit gegenüber Radialschwingungen erlaubt diese Maßnahme auch eine Herabsetzung der Genauigkeitsanforderungen und damit eine beträchtliche Vereinfachung der Fertigung der elektrischen Maschine.

Eine derart kompakte aufgebaute elektrische Maschine hat im allgemeinen eine relativ geringe Induktivität. Um hier dennoch beispielsweise mit Hilfe einer getakteten Spannung einen möglichst genau sinusförmigen Strom zum Erzeugen der elektrischen Dreh- bzw. Wanderfelder zu erzielen, arbeitet der Wechselrichter vorteilhaft zumindest zeitweise mit einer hohen Taktfrequenz, insbesondere 10 kHz bis 100 kHz und höher (Anspruch 22). Diese Maßnahme ist auch vorteilhaft zur Erzielung einer hohen zeitlichen Auflösung des Sy-

stems: Beispielsweise kann man mit einer Taktfrequenz von 20 kHz eine zeitliche Auflösung im Drehmomentverhalten der elektrischen Maschine von 2 kHz erzielen, mit der man eine Drehungleichförmigkeit bei 200 Hz wirksam verringern kann (200 Hz entsprechen zum Beispiel der vierten Ordnung bei 3000 U/min). Eine hohe Taktfrequenz hat ferner auch den Vorteil, eine kompakte Bauweise des Wechselrichters selbst zu erlauben: Denn beispielsweise bei einem Spannungszwischenkreis-Wechselrichter ist die Kapazität im Zwischenkreis, welche den elektronischen Schaltern des Wechselrichters die Zwischenkreisspannung bereitstellt, umgekehrt proportional zur Frequenz, so daß bei höherer Taktfrequenz hierfür eine kleinere Kapazität ausreicht. Die kleineren Zwischenkreiskondensatoren können mit kurzen Leitungswegen unmittelbar neben den elektronischen Schaltern angeordnet werden. Ferner kann eine nötige EMV-Filterung (EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit) des Wechselrichters nach außen kompakter ausgeführt sein, da die Größe der Filter umgekehrt proportional zur Taktfrequenz ist.

Als weitere vorteilhafte Maßnahme zur Erzielung einer kompakten Bauweise des Wechselrichters sind elektronische Schalter des Wechselrichters fluidgeköhlt, vorzugsweise siedebadgeköhlt (Anspruch 23). Als Siedebad-Kühlmittel kann beispielsweise ein Fluorkohlenwasserstoff verwendet werden. Bei der Siedebadkühlung verdampft das Kühlmittel an Wärmepunkten und entzieht ihnen dadurch seine relativ hohe Verdampfungswärme. Der Dampf steigt auf und kann z. B. in einem externen Kühler kondensieren und dabei seine Verdampfungswärme abgeben. Diese Kühltechnik erlaubt kompakteste Anordnung der elektronischen Schalter des Wechselrichters ohne jegliche Kühlkörper. Daneben hat sie den Vorteil, daß zur Erreichung auch hoher Kühlleistung relativ geringe Temperaturdifferenzen ausreichen: Während bei einer Luftkühlung üblicherweise eine Temperaturdifferenz von 40°C zwischen Kühloberfläche und einem zu kühlenden Chip nötig ist, reicht hier bereits eine Differenz von 2–10°C, insbesondere ungefähr 5°C aus. Als Folge sind hohe Umgebungstemperaturen tolerabel, beispielsweise bei einer Chiptemperatur von 65°C eine Umgebungstemperatur bis 60°C. Die Abwesenheit von Kühlkörpern und die hohe erzielbare Kompaktheit ermöglicht ferner eine hohe Rüttelfestigkeit; daneben erlaubt das Siedebad die Schaffung einer sauerstofffreien Atmosphäre im Bereich der elektronischen Bauelemente des Wechselrichters, was sich insgesamt lebensdauerverlängernd auswirkt. Das den Kühlraum bildende Gehäuse kann — wenn es aus leitendem Material ausgeführt ist — auch als Abschirmung dienen. Elektrische Zwischenkreisspeicherelemente zum Bereitstellen der taktenden Spannung bzw. zu taktenden Stroms können innerhalb des Kühlgehäuses angeordnet sein, wodurch sich kurze Leitungswege ergeben können. Ein ggf. gesonderter elektrischer Bremsenergie-Speicher kann innerhalb oder außerhalb des Kühlgehäuses angeordnet sein. Die im letzteren Fall möglicherweise relativ hohen Zuleitungsinduktivitäten stören nicht, da der Bremsenergie-Speicher auf einer relativ "langsamen" Zeitskala arbeitet.

Eine weitere kühntechnisch vorteilhafte Maßnahme besteht darin, mehrere elektronische Schalter des Wechselrichters, insbesondere 2 bis 20 und mehr, parallel zu schalten (Anspruch 24). Die Parallelschaltung führt zu einer verteilten Anordnung der Wärmequellen und damit einer relativ geringen Verlustleistungsdichte.

Der Wechselrichter umfaßt vorteilhaft als Schalter

Halbleiterschalter, vorzugsweise schnelle Halbleiterschalter, wie Feldeffekttransistoren — besonders vorzugsweise Metalloxidhalbleiter(MOS)-Feldeffekttransistoren, bipolare Transistoren und/oder bipolare Transistoren mit isoliertem Gateanschluß (IGBTs) (Anspruch 25). Unter "schnellen" Halbleiterschaltern werden insbesondere solche verstanden, die maximale Taktfrequenzen von 10 bis 100 kHz oder mehr erlauben. MOS-Feldeffekttransistoren haben bei hohen Taktfrequenzen die relativ geringsten Verluste. Sie weisen eine ohmsche Charakteristik auf (während andere Halbleiterbauelemente im allgemeinen eine feste Verlustcharakteristik haben), so daß im Teillastbetrieb die Verluste relativ gering sind.

Der Wechselrichter erzeugt die für die magnetischen Felder der elektrischen Maschine benötigten Spannungen und/oder Ströme vorzugsweise durch Pulse, insbesondere auf der Grundlage von Pulsweiten- oder Pulsamplitudenmodulation (Anspruch 26). Bei konstanter Zwischenkreisspannung lassen sich durch sinusbewehrte Pulsweitenmodulation bei hohen Taktfrequenzen aufgrund der Maschineninduktivität nahezu sinusförmige Ströme beliebig einstellbarer Frequenz, Amplitude und/oder Phase erzeugen. Bei der Pulsamplitudenmodulation geht man beispielsweise aus von einem Wechselrichter mit variabler Zwischenkreisspannung und erzeugt so Pulse verschiedener Amplituden.

Zur optimalen Ausnutzung des z. B. in einem Kraftfahrzeug zur Verfügung stehenden Bauraumes ist es vorteilhaft, daß in die elektrische Maschine, und zwar insbesondere in deren Läufer, eine Kupplung, vorzugsweise eine Fahrkupplung integriert ist (Anspruch 27). Beispielsweise bei einer linearmotorähnlich aufgebauten Asynchron- und Synchronmaschine mit innenliegendem Läufer kann der Läufer in seinem inneren Bereich funktionslos sein und so zur Aufnahme z. B. einer schaltbaren kraftschlüssigen Kupplung hohl ausgebildet sein. Durch diese Maßnahme ist es möglich, daß die elektrische Maschine samt integrierter Kupplung in Axialrichtung nur so viel wie oder kaum mehr Raum in Anspruch nimmt als bei einem herkömmlichen Kraftfahrzeug die Kupplung alleine benötigt. Aufgrund des reduzierten verfügbaren Durchmessers und zur Minimierung des Massenträgheitsmomentes ist eine Ausführung als Mehrscheiben- und/oder Lamellenkupplung bevorzugt. Ist die integrierte Kupplung als Naßkupplung ausgebildet, kann das Kupplungsfluid auch für die Kühlung der elektrischen Maschine sorgen. Die Betätigung der Kupplung kann mechanisch, elektrisch, hydraulisch, pneumatisch oder mit Mischformen hiervon erfolgen.

Um bei dem System zu jedem Zeitpunkt die momentane Winkellage der Welle zu kennen, ist die elektrische Maschine oder die Welle vorteilhaft mit einem Läuferlage- bzw. Wellenlage-Geber ausgerüstet (Anspruch 28). Aus der Information über die momentane Winkellage kann auf die momentane Winkelgeschwindigkeit und -beschleunigung und damit auf momentane Drehungleichförmigkeiten geschlossen werden. Auf dieser Information kann — wie oben ausgeführt wurde — bei einem geregelten System die Drehungleichförmigkeits-Verringerung basieren. Bei einem gesteuerten System wird die Information über die momentane Winkellage und ggf. die momentane mittlere Drehzahl gebraucht, um den richtigen Erwartungswert aus dem Kennfeld auszulesen. Die Information über die momentane mittlere Drehzahl wird auch zur Bestimmung der in der Maschine benötigten magnetischen Felder verwendet, ebenso bei einer Synchronmaschine die Information über die

momentane Winkellage des Läufers. Zur Gewinnung einer möglichst genauen Winkellage-Information kann insbesondere ein Drehtransformator (ein sog. Resolver) dienen, also ein Transformator mit winkellabhängigem Übertragungsverhältnis. Auch hochauflösende Kodierer sind für diesen Zweck einsetzbar, z. B. eine Kombination aus einem hochauflösenden Inkrementalgeber und einem einfachen Absolutgeber.

Das Drehungleichförmigkeits-Verringerungssystem kann als von einem Antriebsaggregat (i. a. ein Verbrennungsmotor) unabhängiges Zusatzsystem konzipiert sein. Alternativ können ein oder mehrere Elemente gemeinsam zur Steuerung der beiden Teilsysteme, also des Antriebsaggregats und der elektrischen Maschine genutzt werden. Hierzu kann wenigstens ein Sensor und/oder wenigstens eine aus Sensorinformation abgeleitete Größe sowohl der Steuerung des Antriebsaggregats als auch der Steuerung der elektrischen Maschine dienen, und/oder eine für die Steuerung der elektrischen Maschine oder des Antriebsaggregats zuständige Steuereinrichtung kann auch das Antriebsaggregat bzw. die elektrische Maschine teilweise oder ganz steuern (Anspruch 29). Die Begriffe "Steuerung" und "steuern" werden hier in einem weiten Sinn verstanden, der auch "Regelung" und "regeln" umfaßt. Auch eine Getriebe- steuerung, etwa eines automatischen Getriebes, wird hier der Antriebsaggregat-Steuerung zugerechnet. Die o. g. gemeinsame Nutzung von Steuerelementen bezieht sich also auch auf das Paar "elektrische Maschine — Getriebe".

Bei dem gemeinsam genutzten Element kann es sich also einerseits um einen Sensor (z. B. einen (Kurbel-)Wellenwinkel-Sensor oder einen Drehmomentmeßeinrichtung) und/oder um aus Sensorinformation abgeleitete Größen (z. B. eine daraus abgeleitete Drehgeschwindigkeit bzw. Drehmomentänderung) handeln, die gemeinsam gesonderten Steuereinrichtungen für das Antriebsaggregat und die elektrische Maschine zugeordnet sind. Andererseits kann es sich hierbei auch um eine Steuereinrichtung selbst handeln, welche für die Steuerung der elektrischen Maschine oder des Antriebsaggregats zuständig ist und daneben auch das Antriebsaggregat bzw. die elektrische Maschine teilweise oder ganz steuert. Selbstverständlich ist es auch möglich, diese beiden Aspekte gemeinsamer Nutzung miteinander zu vereinen, d. h. wenigstens einen Sensor bzw. eine aus Sensorinformation abgeleitete Größe und eine Steuereinrichtung gemeinsam für die Steuerung der elektrischen Maschine und des Antriebsaggregats zu nutzen.

Die Tatsache, daß die beiden Teilsysteme völlig unterschiedliche Funktionen haben, scheint zunächst für deren unabhängige Steuerung zu sprechen, wie es auch im eingangs erwähnten Stand der Technik vorgeschlagen wird. Die hier gelehnte gemeinsame Nutzung von Steuerelementen kann jedoch vorteilhaft sein, da aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen, welche an die beiden Teilsysteme gestellt werden, manche Sensoren bzw. aus Sensorinformation abgeleiteten Größen des einen Teilsystems genauer und/oder schneller als die des anderen arbeiten müssen, und da die Steuereinrichtung des einen Teilsystems zumindest hinsichtlich mancher Steueraufgaben genauer und schneller arbeitet als die des anderen Teilsystems. Beispielsweise kann zur Drehungleichförmigkeits-Verringerung ein sehr hochauflösender Drehwinkelsensor bereitstehen, von dem schnell und genau die momentane Triebwellenwinkelstellung und ggf. auch die momentane Drehgeschwin-

digkeit abgeleitet wird; die Verwendung dieser Steuerelemente kann bei der Antriebsaggregatsteuerung (z. B. Steuerung des Zünd- und/oder Einspritzbeginn-Zeitpunkts) hilfreich sein. Entsprechendes gilt, wenn beispielsweise eines der Teilsysteme eine sehr leistungsfähige und schnelle Steuer- bzw. Regeleinrichtung, z. B. in Form eines Hochleistungscomputer-Systems aufweist. Zum Beispiel kann eine sehr hochfrequente Steuereinrichtung der elektrischen Maschine zu einem Geschwindigkeitszuwachs in der Steuerung bzw. Regelung des Antriebsaggregats führen.

Vorzugsweise mißt der gemeinsam genutzte Sensor eine oder mehrere der folgenden Größen und/oder ist die aus Sensorinformation abgeleitete, gemeinsam genutzte Größe eine der folgenden Größen: Triebwellen-Winkelstellung, Drehzahl, — Winkelbeschleunigung, Lastzustand, Temperatur, Abgaszusammensetzung, Verbrennungsluftmenge bzw. -masse, Drosselklappenstellung, Kraftstoffmenge, Einspritzzeitpunkt, Gasdruck, jeweils des Antriebsaggregats; zum Antrieb der elektrischen Maschine dienender Strom, Zwischenkreisspannung, Frequenz, Phase, Schaltzustände von Wechselrichterschaltern, jeweils des Wechselrichters (falls vorhanden); Winkelstellung, Drehzahl, Winkelbeschleunigung, Drehmoment, jeweils der elektrischen Maschine; Geschwindigkeit, Längs- und Querbeschleunigung, jeweils des Fahrzeugs; Drehzahl der Getriebeabtriebswelle; Winkelstellung, Drehzahl, Winkelbeschleunigung, jeweils eines oder mehrerer Fahrzeugräder; Schlupf eines oder mehrerer Antriebsräder; Zylinderabschalt- und/oder -anschaltsignal. Aus den elektrischen Größen Strom, Zwischenkreisspannung, Frequenz, Phase und/oder Schaltzustände von Wechselrichterschaltern kann ohne weitere Sensoren auf den momentanen Fluß, das momentane Drehmoment und die momentane Drehzahl geschlossen werden.

Die gemeinsame Steuerung der beiden Teilsysteme braucht nicht etwa permanent vorzuliegen. Es kann vielmehr vorteilhaft sein, daß die für die Steuerung der elektrischen Maschine bzw. des Antriebsaggregats zuständige Steuereinrichtung das Antriebsaggregat bzw. die elektrische Maschine nur während bestimmter Betriebszustände teilweise oder ganz steuert. Wenn beispielsweise im Leerlaufbetrieb des Antriebsaggregats eine Antriebsaggregat-Steuereinrichtung die Leerlaufdrehzahl durch rückgekoppelte Regelung konstant zu halten sucht und gleichzeitig die elektrische Maschine zur Drehungleichförmigkeits-Verringerung wechselnde Drehmomente auf die Triebwelle ausübt, kann es zu Regelinterferenzen kommen. Läßt man hingegen die für die elektrische Maschine zuständige Steuereinrichtung auch die Steuerung der Leerlaufdrehzahl des Antriebsaggregats übernehmen (oder umgekehrt), so kann man derartige Steuerinterferenzen ausschließen. In anderen Betriebszuständen jenseits des Leerlaufbetriebs kann die Steuerung der beiden Teilsysteme hingegen getrennt durchgeführt werden.

Die für die Steuerung der elektrischen Maschine zuständige Steuereinrichtung ist i. a. — insbesondere wenn sie einen Wechselrichter ansteuert — sehr schnell und leistungsfähig und kann daher vorteilhaft eine oder mehrere der folgenden Steueraufgaben zur Steuerung (oder auch rückgekoppelten Regelung) des Antriebsaggregats teilweise oder ganz übernehmen: Drehzahlsteuerung (insbesondere im Leerlauf), Kraftstoffzufuhrsteuerung, Drosselklappensteuerung (insbesondere im Leerlauf), Kraftstoffeinspritz-Steuerung, Zündungssteuerung, Ventilsteuerung (bei Motoren mit verstellba-

ren Ventilsteuerzeiten oder elektromagnetisch betätigten Ventilen), Kühlungssteuerung (z. B. bei Antriebsaggregaten mit hohem Kühlmitteltemperaturniveau (z. B. 130°C) und aktiver Kühlung), Abgasreinigungssteuerung (z. B. Lambdasteuerung), Abgasrückführungssteuerung, Klopfregelung, Ladedruckregelung, Zylinderabschaltung, Start-Stop-Steuerung, Getriebesteuerung.

Grundsätzlich ist es jedoch auch möglich, daß die für die Steuerung des Antriebsaggregats zuständige Steuereinrichtung eine oder mehrere der folgenden Steueraufgaben zur Steuerung der elektrischen Maschine teilweise oder ganz übernimmt: Drehmomentsteuerung, direkte oder indirekte Ansteuerung von Wechselrichter-Schaltern (bei wechselrichter-gesteuerter elektrischer Maschine), Steuerung einer Starterfunktion (falls die elektrische Maschine auch als Starter fungiert), Steuerung der Zusatzdrehmoment-Funktion, z. B. der elektromagnetischen Kupplungs- und/oder Synchronisierungsfunktion (falls die elektrische Maschinen diese Funktionen ausführt) oder einer Generatorfunktion (falls die elektrische Maschine auch als Generator fungiert).

Diese beiden Möglichkeiten sind im übrigen in dem Grenzfall deckungsgleich, in dem eine gemeinsame Steuereinrichtung die gesamte Steuerung sowohl des Antriebsaggregats als auch der elektrischen Maschine übernimmt.

Der Innenwirkungsgrad eines Verbrennungsmotors (insbesondere eines Verbrennungsmotors mit äußerer Gemischbildung und Fremdzündung) fällt bei kleinen effektiven Zylinder-Mitteldrücken stark ab, wobei dieser Abfall bei niedrigen Drehzahlen besonders ausgeprägt ist. Leistungsstarke Motoren arbeiten daher, wenn ihnen wenig Leistung relativ zu ihrer Maximalleistung abgefordert wird — also ihr effektiver Mitteldruck gering ist — nur mit einem relativ schlechten Wirkungsgrad.

Ein Abschalten einzelner Motorzylinder in solchen Betriebszuständen kann den Wirkungsgrad erhöhen; siehe z. B. "Kraftfahrtechnisches Taschenbuch", Herausgeber: Robert Bosch GmbH, Düsseldorf, 21. Auflage, 1991, Seite 361. Denn die Zylinderabschaltung bewirkt eine deutliche Erhöhung des effektiven Mitteldrucks in den nicht-abgeschalteten Zylindern, womit eine beträchtliche Erhöhung des Wirkungsgrades (und zwar um insgesamt bis zu 30%) mit entsprechender Kraftstoffersparnis einhergeht.

Allerdings kommt es i. a. im Zylinderabschaltbetrieb zu größeren Drehungleichförmigkeiten, da üblicherweise Motoren so konstruiert sind, daß sich die Massenkkräfte und (mittlere) Gaskräfte teilweise kompensieren, bei Zylinderabschaltung jedoch die Gaskräfte praktisch wegfallen, wodurch auch dieser Kompensationseffekt entfällt. Die Folge sind größere Drehungleichförmigkeiten, die Ursache störender Geräusche- und Vibrationsentwicklung sein können, erhöhten Verschleiß verursachen können und zu Komforteinbußen führen können.

Um bei einem mehrzylindrigen Verbrennungsmotor den Innenwirkungsgrad zu erhöhen ohne dabei Drehungleichförmigkeiten verstärkt auftreten zu lassen, umfaßt das System eine Einrichtung zur Abschaltung wenigstens eines Teils der Zylinder des Verbrennungsmotors, wobei das System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten wenigstens während Zylinderabschaltbetrieb zumindest bei bestimmten Betriebszuständen aktiv ist (Anspruch 30). Diese Maßnahme führt zu geringeren Drehungleichförmigkeiten im Zylinder-

der-Abschaltbetrieb; führt daher zu geringerer Geräusch- und Vibrationsentwicklung und vermindertem Verschleiß; erlaubt eine Zylinderabschaltung sogar bei Vierzylindermotoren; und kann aufgrund dieser Eigenschaften zu einer größeren Verbreitung von Antriebssystemen mit Zylinderabschaltung und damit zu einer Verringerung des Rohstoffverbrauchs und der Umweltbelastung beitragen.

Der Begriff "Zylinderabschaltung" wird im übrigen in einem weiten Sinn verstanden, der alle Möglichkeiten umfaßt, einen oder mehrere Zylinder nicht mehr aktiv antreibend (und nicht mehr unter Durchsatz von Kraftstoff) zu betreiben. Bevorzugt wird dies durch eine Kraftstoff- und ggf. Zündungsabschaltung der entsprechenden Zylinder erzielt, welche zwecks Verringerung von Gaswechselerarbeit durch eine sog. Ventilabschaltung ergänzt sein kann. Grundsätzlich möglich ist auch eine mechanische Stilllegung des bzw. der entsprechenden Zylinder, bei der i.a. ebenfalls gegenüber dem Betrieb aller Zylinder stärkere Drehungleichförmigkeiten auftreten. Ein — hier ebenfalls mit umfaßter — Sonderfall ist die Abschaltung aller Zylinder des Verbrennungsmotors im Schiebetrieb.

Das System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten kann im Zylinderabschalt- und -anschaltbetrieb aktiv sein, und zwar dauernd oder nur in bestimmten Betriebszustände des Verbrennungsmotors (z. B. nur unterhalb einer bestimmten Drehzahl oder nicht während Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen). Gegebenenfalls kann sich die Stärke, mit der es auf die Triebwelle wirkt, zwischen Abschalt- und Anschaltbetrieb unterscheiden. Alternativ kann es nur während des Zylinderabschaltbetriebs aktiv sein, wobei wiederum eine dauernde oder eine auf bestimmte Betriebszustände des Verbrennungsmotors beschränkte Aktivität möglich ist.

Grundsätzlich kann das System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten so gesteuert sein, daß seine drehungleichförmigkeitsverringende Wirkung unabhängig davon ist, ob Zylinderabschalt- oder -anschaltbetrieb vorliegt. Nimmt man beispielsweise an, daß die Drehungleichförmigkeiten im Anschaltbetrieb halb so groß sind wie im Abschaltbetrieb, dann könnte es z. B. so gesteuert sein, daß es im Anschaltbetrieb die Drehungleichförmigkeiten praktisch vollständig unterdrückt, während es sie im Abschaltbetrieb verringert. Vorteilhaft folgt es jedoch der Änderung der Drehungleichförmigkeiten verändert also bei einem Übergang von Zylinderabschalt- zu -anschaltbetrieb und/oder zurück seine Verringerungswirkung, im allgemeinen durch eine Änderung von Phasen und Amplituden der zur Verringerung aufgetragenen Drehmomente. Durch diese Maßnahme kann man Drehungleichförmigkeiten sowohl im Abschaltbetrieb als auch im Anschaltbetrieb nahezu vollständig unterdrücken.

Da — wie gesagt — die Drehungleichförmigkeiten i.a. im Abschaltbetrieb größer als im Anschaltbetrieb sind, nimmt die Verringerungswirkung beim Übergang von Zylinderanschalt- zu Zylinderabschaltbetrieb vorzugsweise zu bzw. bei einem umgekehrten Übergang ab.

Falls das System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten durch Erfassung der momentan tatsächlich vorliegenden Drehungleichförmigkeit allein auf der Grundlage rückgekoppelter Regelung gesteuert wird, kann grundsätzlich die rückgekoppelte Regelung auch beim Übergang von Zylinderanschalt- zu Zylinderabschaltbetrieb und/oder umgekehrt für eine entsprechende Änderung der Verringerungswirkung sorgen.

Um jedoch bei diesen Übergängen eine Regelverzögerung auszuschließen und eine möglichst instantane Änderung der Verringerungswirkung herbeizuführen, ruft vorzugsweise die Steuerinformation, welche zur

5 Steuerung des Übergangs von Zylinderanschalt- zu -abschaltbetrieb und/oder umgekehrt dient, auch die Veränderung der Verringerungswirkung hervor. Beispielsweise kann bei einem kennfeldgesteuerten System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten das die Zylinderab- und -anschaltung herbeiführende Steuersignal auch eine Umschaltung zwischen zwei (ggf. adaptiven) Kennfeldern herbeiführen, von denen eines Information über die (erwartete) Drehungleichförmigkeiten bei Abschaltbetrieb und das andere diejenige bei

10 Anschaltbetrieb enthält. Bei einer rückgekoppelten Regelung mit Vorsteuerung kann das Steuersignal z. B. auch zu einer entsprechenden, vom Zylinderab- bzw. -anschaltzustand abhängigen Voreinstellung der Regelung dienen, um so eine Regelverzögerung zu vermeiden.

Im Bereich privater Kraftfahrzeuge gibt es bei vielen Benutzern Widerstände gegen Antriebssysteme mit Zylinderabschaltung, da ihnen die Empfindung, statt beispielsweise mit einem Sechszylindermotor zeitweise nur noch mit einem "Dreizylindermotor" zu fahren, unangenehm ist. Vorteilhaft ist daher das Antriebssystem so ausgebildet, daß der Zylinderabschaltbetrieb und Übergänge in den und aus dem Zylinderabschaltbetrieb für einen Benutzer im wesentlichen unmerklich sind, (was von Drehungleichförmigkeiten herrührende Wahrnehmungen des Benutzers, wie entsprechende Geräusche und Vibrationen betrifft; verbleiben könnten z. B. geringfügige Unterschiede im Auspuffgeräusch). Erreicht wird dies durch eine derartige Steuerung der Drehungleichförmigkeits-Verringerungswirkung, daß die verbleibenden Drehungleichförmigkeiten zumindest an den Übergängen praktisch gleich im An- wie im Abschaltbetrieb sind (und vorzugsweise einen verschwindenden Absolutwert haben).

Im Stadtverkehr laufen Verbrennungsmotoren von Kraftfahrzeugen aufgrund häufiger Halte an Ampeln und Kreuzungen einen beträchtlichen Teil ihrer Betriebszeit im Leerlauf. Dies stellt eine erhebliche Ressourcenverschwendung und Umweltbelastung dar, da es einen an sich unnützen Mehrverbrauch an Kraftstoff mit einhergehender Emission giftiger, klimaaktiver oder sonstwie schädlicher Abgase mit sich bringt.

Um diese unnötigen Leerlaufphasen zu verringern, sind bereits Personenkraftwagen mit einer sog. Start-Stop-Automatik realisiert worden. Hierbei wird der Verbrennungsmotor bei Eintritt einer bestimmten Stopbedingung (z. B. Fahrzeugstillstand und Motor-Leerlauf) automatisch gestoppt, beispielsweise durch Unterbrechen der Kraftstoffzufuhr. Bei Eintritt einer bestimmten Startbedingung (z. B. Betätigen des Fahrpedals oder Einlegen eines Ganges) wird der Verbrennungsmotor dann wieder mit Hilfe des elektrischen Starters des Fahrzeugs automatisch gestartet.

Obwohl diese bekannten Antriebssysteme mit Start-Stop-Automatik grundsätzlich funktionieren und eine Verringerung des Gesamt-Kraftstoffverbrauchs möglich erscheinen lassen, haben sie doch auch Probleme, die bislang ihre Verbreitung erschwert haben: Die verwendeten herkömmlichen Starter verursachen ein relativ lautes Startgeräusch, was hauptsächlich von den Getriebegeräuschen der Ritzelübersetzung des hochübersetzten Startermotors herrührt (die Übersetzung ist i.a. 1 : 10 bis 1 : 20). Während beim herkömmlichen Kraft-



fahrzeug ohne Start-Stop-Automatik der Starter nur recht selten betätigt wird und daher das laute Startergeräusch hingenommen wird, führt es bei Start-Stop-Automatik mit der dann häufigen Starterbetätigung zu einer störenden Geräuschbelästigung der Fahrzeuginsassen sowie der Straßenanwohner im Bereich von Ampeln und Kreuzungen. Darüber hinaus unterliegt der Starter mit seinem Magnetschalter, Ritzel, Einspurmittel und Elektromotor bei der häufigen Betätigung einem außergewöhnlich hohen Verschleiß, dem ein üblich dimensionierter Starter kaum gewachsen ist; es wird daher bei bekannten Antriebssystemen mit Start-Stop-Automatik ein — eigentlich überdimensionierter — Lastwagenanlasser verwendet.

Auch ein in dem Buch D. Henneberger "Elektrische Motorausrüstung", Braunschweig 1990, Seiten 98—103, vorgeschlagener Schwungrad-Starter-Generator scheint für ein Start-Stop-Automatik kaum geeignet, da er eine relativ lange Totzeit nach einem Start hat und zu Kupplungsverschleiß führt. Er umfaßt einen als Schwungrad ausgebildeten Läufer, welcher im Antriebsstrang eines Kraftfahrzeugs auf der Abtriebswelle zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe sitzt und von diesen mit Hilfe je einer Kupplung entkoppelbar ist. Zum Starten wird zunächst das entkoppelte — und damit leerlaufende — Schwungrad elektromotorisch beschleunigt. Der eigentliche Startvorgang erfolgt dann bei einer zum Starten ausreichenden Schwungrad-Drehzahl (z. B. bei 1000 U/min) durch schnelles Schließen der Kupplung zum Verbrennungsmotor. Dadurch wird das Schwungrad abgebremst und die Kurbelwelle des Verbrennungsmotors beschleunigt, bis beide eine gemeinsame mittlere Drehzahl (z. B. 500 U/min) erreichen und der Selbstanlauf des Verbrennungsmotors erfolgt.

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist das System Teil eines mit einer automatischen Start-Stop-Steuerung des Verbrennungsmotors ausgerüsteten Antriebssystems; die elektrische Maschine ist dabei direkt mit der Triebwelle des Verbrennungsmotors gekoppelt oder koppelbar und ist so ausgebildet, daß sie den Verbrennungsmotor im Zusammenlauf aus dem Stand starten kann (Anspruch 31).

Unter einer "direkten" Kopplung" wird insbesondere eine getriebe lose Kopplung des Läufers der elektrischen Maschine mit der Triebwelle verstanden. Die Drehzahl des Läufers gleicht dann vorzugsweise der Drehzahl des Verbrennungsmotors. Bei einem "Zusammenlauf" bleibt das Verhältnis der momentanen Drehzahlen des elektrischen Motors und des Antriebsaggregats — im Unterschied zu dem o.g. Schwungradstarter — im wesentlichen konstant (und zwar hat es insbesondere den Wert Eins). Zusammenlauf "aus dem Stand" bedeutet, daß die elektrische Maschine und das Antriebsaggregat — anders als bei dem o.g. Schwungrad-Starter — gemeinsam aus dem Stand hochlaufen.

Vorteile dieser Ausgestaltung der Erfindung sind: aufgrund der direkten Kopplung oder Koppelbarkeit der elektrischen Maschine mit der Triebwelle des Verbrennungsmotors erzeugt der Starter praktisch keine hörbaren Geräusche; aufgrund des Zusammenlaufs aus dem Stand erfolgt das Starten schnell und mit nur geringer Totzeit; aufgrund der direkten Kopplung und des Zusammenlaufs ist der Starter praktisch verschleißfrei und erreicht einen relativ sehr hohen Wirkungsgrad; im Vergleich zu einem Schwungrad-Starter hat er ein relativ geringes Gewicht, günstig ist auch der Fortfall des Kupplungssystems zum Einkoppeln des Schwungrads;

insgesamt kann das Antriebssystem aufgrund dieser vorteilhaften Eigenschaften zu einer größeren Verbreitung der Start-Stop-Automatik führen und so durch Verringerung des Rohstoffverbrauchs und der Emission von Abgasen einen wesentlichen Beitrag zum Umweltschutz leisten.

Vorteilhaft sitzt der Läufer der elektrischen Maschine auf der Triebwelle (i.a. der Kurbelwelle) des Verbrennungsmotors oder einer (ggf. von ihr entkuppelbaren) Verlängerung. Er ist vorzugsweise drehfest mit der Triebwelle verbunden.

Die automatische Start-Stop-Steuerung veranlaßt vorzugsweise ein automatisches Stoppen des Verbrennungsmotors, wenn eine Stopbedingung (oder eine von mehreren) erfüllt ist. Zur Definition einer Stopbedingung können verschiedene Einzelbedingungen dienen, z. B.: Nulllast, Schiebebetrieb, Leerlauf des Verbrennungsmotors (d. h. Drehzahl unterhalb eines bestimmten niedrigen Wertes), Stillstand des Kraftfahrzeugs (d. h. Fahrgeschwindigkeit unterhalb eines bestimmten kleinen Wertes, z. B. 4 km/h), Verbrennungsmotor ist ausgekuppelt, kein Gang ist eingelegt, die Betriebs- oder Feststellbremse ist betätigt, Betätigung eines Stoppschalters. Diese Einzelbedingungen können die Stopbedingung allein definieren (z. B. Stopbedingung = Stillstand des Kraftfahrzeugs) oder in beliebiger (Unter-)Kombination (z. B. Stopbedingung = Leerlauf des Verbrennungsmotors und Stillstand des Kraftfahrzeugs) und/oder in Kombination mit weiteren Betriebsbedingungen z. B. daß die Betriebstemperatur des Verbrennungsmotors erreicht ist und/oder der Ladezustand der Batterie für weitere Starterbetätigungen ausreichend ist. Das Stoppen des Verbrennungsmotors kann entweder sofort bei Eintritt der Stopbedingung (d. h. mit sehr kurzer Reaktionszeit) oder zeitverzögert (z. B. mit einer Reaktionszeit von einigen Sekunden) erfolgen. In die Stopbedingung können auch Größen eingehen, welche die Fahr-Vorgeschichte betreffen, z. B. kann es erforderlich sein, daß das Fahrzeug seit dem letzten Stoppen des Verbrennungsmotors wenigstens einmal gefahren ist. Auch ist es möglich, aus der vorausgehenden Fahrcharakteristik zu erkennen, ob sich das Fahrzeug etwa im Stadtverkehr, einem Stop-and-Go-Verkehr einer Verkehrsstauung oder im Überlandverkehr befindet; die Größe "Stadtverkehr" kann als weitere Einzelbedingung für die Stopbedingung gefordert sein. Die Reaktionszeit kann adaptiv variabel sein, in Abhängigkeit von Einzel- oder Betriebsbedingungen oder der Fahr-Vorgeschichte, z. B. kann sie in dem Fall, daß in der nahen Vergangenheit viele Ampelhalte vorgekommen sind, automatisch verkürzt und im gegenteiligen Fall verlängert werden.

Entsprechend veranlaßt die Start-Stop-Steuerung vorzugsweise bei Vorliegen einer Startbedingung (oder einer von mehreren) ein automatisches Starten des Verbrennungsmotors mit Hilfe der elektrischen Maschine. Auch zur Definition der Startbedingung können verschiedene Einzelbedingungen — allein oder in (Unter-)Kombination — dienen, z. B. Betätigung des Fahrpedals, Lösen der Betriebs- bzw. Feststellbremse, Betätigen der Kupplung, Berühren oder Bewegen eines Gangschalthebels, Einlegen eines Ganges, Betätigen eines Startschalters. Für die Startbedingung kann das Erfülltsein noch weiterer Bedingungen gefordert sein, z. B. daß der Motor stillsteht und/oder zuvor durch automatischen Stop abgeschaltet worden ist. Ein "Notstart" kann ausgelöst werden, wenn z. B. die Temperatur des Verbrennungsmotors unter die Betriebstemperatur ab-

nimmt oder der Ladezustand der Batterie unter einen Grenzwert absinkt. Um hierbei ein unbeabsichtigtes Anfahren des Kraftfahrzeugs auszuschließen, kann jedoch das Erfülltsein einer entsprechenden Bedingung — wie etwa "Kein Gang eingelegt" — erforderlich sein.

Herkömmliche Starter bringen wegen ihrer hohen Übersetzung den Verbrennungsmotor nur auf eine relativ niedrige Start-Drehzahl (typischerweise 100–200 U/min), die weit unterhalb dessen Leerlauf-Drehzahl (typischerweise 700–800 U/min) liegt. Entsprechendes gilt für den o.g. Schwungrad-Starter, will man Totzeit und Kupplungsverschleiß in akzeptablen Grenzen halten. Die Drehzahldifferenz zwischen Start-Drehzahl und der Leerlauf-Drehzahl muß der Verbrennungsmotor dann aus eigener Kraft überwinden. Er benötigt hierfür jedoch — da er sich bei diesen Drehzahlen weit unterhalb seiner Leerlauf-Drehzahl in einem sehr ungünstigen Betriebsbereich befindet — ein relativ großes Quantum Kraftstoff, welches zudem nur unvollständig verbrennt. Jeder Motorstart ist daher mit zusätzlichem Kraftstoffverbrauch und besonders umweltschädlichen Emissionen verbunden. Dies macht insgesamt einen Teil der ökologisch günstigen Auswirkungen einer Start-Stop-Automatik wieder zunichte. Vorzugsweise ist daher das Antriebssystem so ausgebildet, daß die elektrische Maschine wenigstens im wesentlichen bis zum Erreichen der Leerlauf-Drehzahl des Verbrennungsmotors (welche bei Betriebstemperatur üblicherweise zwischen 700 und 1000 U/min liegt) antreibend wirkt. Diese Maßnahme läßt den Verbrennungsmotor praktisch erst bei Erreichen seiner Leerlaufdrehzahl anlaufen und läßt so das betrieblich ungünstige Hochlaufen aus eigener Kraft entfallen. Sie vermindert damit den Kraftstoffverbrauch und die besonders schädlichen Emissionen beim Starten und macht zudem den Startvorgang schneller. Die Maßnahme ist also ökologisch besonders vorteilhaft und ist besonders geeignet, zu einer noch größeren Verbreitung von Antriebssystemen mit Start-Stop-Automatik beizutragen.

Vorgeschlagen wurden auch automatische Start-Stop-Steuerungen, bei denen der Verbrennungsmotor außerdem im Schubetrieb (z. B. bei Berg-ab-Fahrt) ausgekuppelt und gestoppt wird. Dabei geht aber schlagartig die Verbrennungsmotor-Bremswirkung verloren. Vorteilhaft wirkt daher die elektrische Maschine im Fall eines Antriebsaggregat-Stops bei Schubetrieb als elektrische Antriebsaggregat-Bremse, die das entfallene Antriebsaggregat-Bremsmoment ersetzt. Hierzu ist vorteilhaft zwischen dem Antriebsaggregat und der elektrischen Maschine eine steuerbar betätigbare Kupplung angeordnet.

Herkömmlicherweise verwendet man in Antriebssystemen von Kraftfahrzeugen reibschlüssige Kupplungen, welche ein Anfahren des Kraftfahrzeugs mit Drehmomentwandlung ("schleifende Kupplung") in der Anfahrphase ermöglichen. Ihre weitere Aufgabe besteht darin, einen Gangwechsel durch Trennen des Antriebsaggregats von einem Schaltgetriebe und anschließendes Wiederverbinden mit einer durch Reibung bewirkten Drehzahlanpassung von Antriebsaggregat und Getriebe zu erlauben. Ferner dienen sie als Überlastschutz und der Schwingungsdämpfung. Diese Reibkupplungen sind hochbeanspruchte Verschleißteile, die laufend überwacht und zum Teil nachgestellt werden müssen. Bei überdurchschnittlicher Beanspruchung, wie z. B. bei übermäßiger Benutzung im Stadtverkehr oder bei belastender Fahrweise erreichen sie zum Teil nicht die Fahrzeuglebensdauer und müssen vorher ersetzt werden.

Die Bedienung einer Reibkupplung ist insbesondere für Fahranfänger kompliziert. Selbst geübten Fahrern gelingt nicht immer ein ruckfreies Anfahren und Schalten, was nicht nur eine Komforteinbuße, sondern auch eine besondere Belastung für das Antriebsaggregat und andere Teile des Antriebssystems darstellt. Ein (nicht immer) vermeidbares "Abwürgen" des Antriebsaggregats beim Anfahren stellt in Gefahrensituationen ein erhebliches Unfallrisiko dar.

Bekannt sind ferner hydrodynamische Kupplungen, zum Teil mit Wandlerfunktion. Diese erlauben im allgemeinen ein nahezu ruckfreies Anfahren und Schalten bei einfacher Bedienung. Sie sind jedoch im Aufbau recht aufwendig. Ihre Steuerbarkeit ist begrenzt; z. B. ist eine völlige Wellentrennung oft nicht erzielbar, so daß es im Leerlauf (in Fahrstellung/Stellung D) zur Schleifahrt kommt. Zudem sind sie mit nicht unbeträchtlichen Verlusten behaftet.

Beim Schalten von einem Gang in einen anderen müssen miteinander zu verbindende Getriebeteile zunächst auf Gleichlauf (d. h. je nach Getriebeart auf gleiche Drehzahl oder gleiche Umfangsgeschwindigkeit) gebracht, d. h. synchronisiert werden. Bei klauengeschaalten Getrieben — die zum Teil für schwere Nutzkraftfahrzeuge verwendet werden — geschieht dies vom Fahrer aus durch Doppelkuppeln (Hochschalten) oder Zwischengas (Rückschalten), was ein hohes Fahrkönnen erfordert. Bei den meisten herkömmlichen Getrieben erfolgt die Synchronisierung mechanisch im Zuge der Schaltbewegung, und zwar durch Reibungsvorkupplung zur kraftschlüssigen Drehzahlangleichung, wobei durch eine Sperreinrichtung das formschlüssige Schalten des Ganges erst nach Abschluß des Synchronisierungsvorgangs ermöglicht wird. Zur Reibungsvorkupplung können z. B. Konusringe dienen. Synchronisierte Getriebe sind konstruktiv und baulich aufwendig. Die Synchronisierereinrichtungen sind hochbeansprucht und verschleißgefährdet. Die für die Synchronisierung erforderlichen Kräfte müssen vom Fahrer mit der Schaltbetätigung aufgebracht werden, was sich in einer relativ hohen Schaltkraft bemerkbar machen kann. Zudem dauert der Synchronisierungsvorgang eine gewisse Zeit, was der Schaltbetätigung i. a. einen zähen Charakter verleiht. Diese Eigenschaften der Schaltbetätigung tragen dazu bei, daß das Schalten selbst bei geübten Fahrern — auch wenn es bei ihnen keine bewußte Aktivität mehr erfordert — einen nicht vernachlässigbaren Teil der Aufmerksamkeit einnimmt, die eigentlich vollständig für das Verkehrsgeschehen zur Verfügung stehen sollte. Somit wirkt sich auch dies insgesamt nachteilig für die Verkehrssicherheit aus.

Um diese Nachteile ganz oder teilweise zu beheben, wirkt die elektrische Maschine als elektromagnetische Kupplung im Antriebsstrang und/oder als aktive Getriebe-Synchronisierereinrichtung oder als Teil hiervon (Anspruch 32).

Der Begriff "Kupplung" wird im Zusammenhang mit elektromagnetischer Kupplung in einem weiten Sinn verstanden: Er umfaßt die Bedeutung von "Kupplung" im engen Sinn, die ausschließlich der ungeänderten Übertragung von Drehzahl und Drehmoment dient (wie z. B. eine formschlüssige Kupplung), sowie von "Wandler", welcher eine Wandlung von Drehzahl und/oder Drehmoment erlaubt (wie z. B. eine reibschlüssige oder eine hydrodynamische Kupplung).

Bei einer elektromagnetischen Kupplung erfolgt die Momentübertragung über die Kupplung hinweg durch elektrische, magnetische oder elektromagnetische Kräfte.



te. Es ist möglich, daß diese Art der Kraftübertragung nur zeitweise vorliegt. Zum Beispiel kann nach Erreichen gleicher Drehzahl der zu kuppelnden Wellen die Kraftübertragung von einer mechanischen Kupplung übernommen werden. Auch eine derartige kombinierte Kupplung wird als "elektromagnetische Kupplung" bezeichnet.

Bei einer "aktiven Getriebesynchronisierung" erfolgt die zum Gleichlauf führende Beschleunigung oder Abbremsung eines der zu verbindenden Getriebeteile nicht passiv durch Vor-Kupplung mit dem anderen Getriebeteil. Vielmehr beschleunigt oder bremst die elektrische Maschine das freilaufende der beiden Getriebeteile beim Schalten aktiv in den Gleichlaufzustand, ohne daß hierfür eine Kopplung oder Vorkopplung mit dem anderen Getriebeteil erforderlich wäre. Mechanische Synchronisiereinrichtungen (Vorkupplung, Konusringe u.ä.) können entfallen. Die erforderliche Gleichlaufdrehzahl kann z. B. bei Erfassung der momentanen Drehzahl der Getriebe-Abtriebswelle auf der Grundlage bekannter Übersetzungsverhältnisse der verschiedenen verbindbaren Getriebeteile schnellstens ermittelt werden, sobald bei der Schaltbetätigung durch Eintritt in eine bestimmte Schaltgasse eindeutig erkennbar ist, welcher Gang eingelegt werden soll. Die Synchronisierung kann in der Zeitspanne erfolgen, die bis zum Erreichen des Endes des Schaltweges — wo die Verbindung der Getriebeteile erfolgt — zur Verfügung steht. Die Synchronisierung erfolgt also ohne Schaltkraft und ohne merkliche Verzögerung der Schaltbetätigung.

Besonders vorteilhaft vereint das System die Funktionen von elektromagnetischer Kupplung und aktiver Synchronisiereinrichtung. Beispielsweise bei einfacheren Systemen kann aber auch jede dieser Funktionen für sich genommen vorteilhaft sein.

Diese Maßnahme hat die Vorteile, daß die elektromagnetische Kupplung und/bzw. die aktive Synchronisiereinrichtung keinem Verschleiß und keiner Wartung unterliegt; die elektromagnetische Kupplung eine genaue Einstellung beliebiger zu übertragender Momente, d. h. Einstellung eines beliebigen Kupplungsschlupfes ermöglicht und damit steuerungstechnisch anderen bekannten Kupplungen überlegen ist; auch die zeitliche Änderung des Kupplungsschlupfes beliebig steuerbar ist, wodurch ein völlig gleichmäßiger selbsttätiger Übergang von maximalem Schlupf zu verschwindendem Schlupf realisierbar ist; die Fahrzeugbedienung dadurch auch für ungeübte Fahrer einfacher ist, Anfahren und/oder Schalten völlig ruckfrei erfolgt, ein Abwürgen des Antriebsaggregats ausgeschlossen ist, was insgesamt einen Gewinn für die Verkehrssicherheit darstellt; bei aktiver Getriebe-Synchronisierung das Getriebe wesentlich einfacher konstruiert und ausgeführt sein kann; das Schalten mit geringerer Schaltkraft und ohne merkliche Zeitverzögerung erfolgen kann und dem Fahrer so mehr Aufmerksamkeit für das Verkehrsgeschehen überläßt; ein Fading der Kupplung, d. h. eine Änderung ihrer physikalischen Eigenschaften infolge von Überhitzung vermieden werden kann; der bei herkömmlichen mechanischen Kupplungen übliche Momentensprung beim Übergang von Gleitreibung auf Haftreibung vermieden werden kann, so daß dadurch ferner sog. "Kupplungsrupfen" bei periodischem Wechsel von Haft- und Gleitreibung entfällt; ein Gewichtsvorteil (geringeres Gewicht) erzielt werden kann, da gegenüber einer herkömmlichen mechanischen Kupplung die schwere Druckplatte entfällt; mit dem erfindungsgemäßen Antriebssystem mittels Software unterschiedliche Kupp-

lungskennlinien, d. h. Momentenverlauf während der Kupplungszeit eingestellt werden können und insbesondere das Kuppeln auch automatisch erfolgen kann; die als Kupplung wirkende elektrische Maschine weniger Teile als eine herkömmliche mechanische Kupplung benötigt, so daß Herstellungskosten reduziert werden können; eine Energierückgewinnung durch generatorisches Bremsen der Wellen beim Schalten möglich ist und während bei einer herkömmlichen, mechanischen Kupplung die Abbremsenergie in Wärme umgesetzt wird, bei der als Kupplung arbeitenden elektrischen Maschine die Abbremsenergie in elektrische Energie umwandelbar ist. Insgesamt erhöht diese Maßnahme den Fahrkomfort, erleichtert die Fahrzeugbedienung und trägt zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit bei.

Bei einer ersten vorteilhaften Ausgestaltung umfaßt das System für die Funktion der elektromagnetischen Kupplung und/oder der Getriebe-Synchronisiereinrichtung zwei elektrische Maschinen, also eine elektrische Doppelmaschine. Im Normalbetrieb — wenn das Antriebsmoment über den Antriebsstrang Drehmoment abgibt — fungiert die erste elektrische Maschine als Generator und die zweite als Motor, wobei die zum Betrieb des Motors benötigte elektrische Energie im wesentlichen von dem Generator bezogen wird. Die vom Antrieb gelieferte mechanische Drehenergie wird also bei dieser Ausgestaltung zunächst über ein Paar relativdrehender elektromagnetischer Wirkflächen (Ständer und Läufer der ersten elektrischen Maschine) in elektrischen Strom verwandelt und dann über ein zweites Paar relativdrehender elektromagnetischer Wirkflächen (Ständer und Läufer der zweiten elektrischen Maschine) wieder in mechanische Drehenergie, ggf. bei anderer Drehzahl und mit anderem Drehmoment zurückverwandelt. Die von der ersten Maschine abgegebene Energiemenge kann größer oder kleiner als die von der zweiten aufgenommene sein. Der Überschuß bzw. Unterschuß kann z. B. in einem Energiespeicher gespeichert bzw. aus einem solchen entnommen werden.

Die Ausgestaltung der Kupplung als elektrische Doppelmaschine erfordert zwar einen gewissen Aufwand, erlaubt dafür aber relativ einfach steuerbare und insbesondere sehr vielfältige Betriebsmöglichkeiten. Falls die beiden elektrischen Maschinen unabhängig steuerbar sind, können sie nämlich gleichzeitig und unabhängig verschiedene Zusatzfunktionen erfüllen. Zum Beispiel kann die erste Maschine während des Kuppelns oder des (durch die zweite Maschine bewirkten) Synchronisierens ein zusätzliches alternierendes Drehmoment zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten der Antriebsaggregat-Triebwelle erzeugen.

Besonders vorteilhaft zur Erzielung einer kompakten und einfach ausgebildeten Doppeleinheit sind die beiden Maschinen koaxial angeordnet und/oder haben ein oder mehrere Teile gemeinsam, wie einen Ständerkörper und/oder ein Gehäuse. Dies erleichtert auch die Möglichkeit, die Maschinen mit einer Überbrückungskupplung zusätzlich mechanisch koppelbar zu machen.

Bei der anderen vorteilhaften Ausgestaltung wird die Kupplung durch eine elektrische Maschine, also eine Einzel-Maschine gebildet, welche wenigstens zwei drehbare elektromagnetische Wirkeinheiten aufweist, von denen eine mit einem antriebsseitigen Drehmomentübertrager und die andere mit einem abtriebsseitigen Drehmomentübertrager gekoppelt oder koppelbar ist. Bei den Drehmomentübertragern handelt es sich i. a. um Antriebs- und Abtriebswelle, etwa die Triebwelle des

Antriebsaggregats und die von der elektrischen Maschine zum Getriebe führende Welle. Die elektromagnetischen Wirkeinheiten entsprechen Läufer und Ständer bei der normalen elektrischen Maschine, jedoch mit dem Unterschied, daß hier neben dem Läufer auch der Ständer drehbeweglich ist. Die Maschine entspricht also einer normalen Maschine mit Läufer und Ständer, welche zusätzlich zur Läuferrotation als Ganzes drehbar ist. Die als Ganzes drehbare Maschine kann zwischen Läufer und "Ständer" positive und negative Relativdrehmomente erzeugen. Auf diese Weise kann der Kupplungsschlupf beeinflußt werden. Dadurch können verschiedene Kupplungswirkungen erzielt werden: Die elektrische Maschine kann beispielsweise derart geregelt werden, daß sich ein geeignetes Relativdrehmoment zwischen Läufer und Ständer einstellt und der Kupplungsschlupf verschwindet (Kupplungsschlupf 0). Dann überträgt die elektrische Maschine Drehzahl und Drehmoment ungeändert — entsprechend einer geschlossenen mechanischen Kupplung. Die elektrische Maschine kann aber auch derart geregelt werden, daß das Relativdrehmoment zwischen Läufer und Ständer verschwindet und sich ein Kupplungsschlupf entsprechend der Relativdrehzahl der Drehmomentübertrager einstellt. Auf diese Weise erzielt man deren vollständige Trennung ohne Drehmomentübertragung — entsprechend etwa einer vollständig geöffneten mechanischen Kupplung. Kupplungsschlupfwerte, die zwischen diesen beiden Werten liegen, sind durch entsprechendes Ansteuern der elektrischen Maschine ebenfalls erreichbar. Darüber hinaus erschließt die elektrische Maschine vorteilhaft auch Drehmoment-Übertragungsbereiche jenseits dieses durch eine übliche Reibkupplung erschlossenen Bereichs: Durch geeignetes Ansteuern der elektrischen Maschine können richtungsunabhängige Drehmomente aufgeschaltet werden, d. h. Drehmomente in und entgegen der Drehrichtung der Drehmomentübertrager. Somit können sowohl negative Kupplungsschlupfwerte durch Erzeugen eines zusätzlich zum Antriebsaggregat antreibenden Drehmoments, als auch Kupplungsschlupfwerte größer als eins — durch Erzeugen eines dem Antriebsaggregat entgegengerichteten bremsenden Drehmoments — eingestellt werden.

Die vom Antrieb gelieferte mechanische Drehenergie wird also bei dieser anderen Ausgestaltung über ein Paar mit einstellbarem Schlupf relativdrehender elektromagnetischer Wirkflächen direkt in Form mechanischer Drehenergie weitergegeben. In bzw. aus elektrischen(m) Strom wird hierbei nur der aufgrund von Schlupf vorliegende Überschuß- bzw. Unterschußanteil verwandelt, der gespeichert bzw. aus einem Speicher entnommen werden kann. Falls die Überschußenergie und/oder -leistung das Speicheraufnahmevermögen übersteigt — was z. B. beim Anfahren der Fall sein kann — kann sie auch dissipiert werden, z. B. in Form von Wärme über (Heizwiderstände etc.).

Die Synchronisierfunktion — also Beschleunigen oder Abbremsen des abtriebsseitigen Drehmomentübertragers bei herausgenommenem Gang — erfolgt bei dieser elektrischen Maschine in Abstützung gegen den mit veränderlicher Drehzahl drehenden antriebsseitigen Drehmomentübertrager. Dessen momentan vorliegende Drehzahl wird bei der Ermittlung der zum Erreichen des Gleichlaufs nötigen Relativdrehzahl zwischen den Wirkelementen berücksichtigt.

Bei der elektromagnetischen Kupplung ist zwar — im Gegensatz zur hydrodynamischen Kupplung — ein verschwindender Kupplungsschlupf einstellbar. Beispiels-

weise erzielt man dies bei einer Asynchronmaschine durch ein von einer Wirkeinheit erzeugtes Drehfeld, welches mit Hilfe eines elektromagnetischen Schlupfes auf die andere Wirkeinheit ein Drehmoment ausübt, das dem momentanen Antriebsmoment betragsmäßig gleicht, aber in der Richtung entgegengesetzt ist, und so ein Verschwinden des Kupplungsschlupfes bewirkt. Man muß jedoch zum Verschwindenlassen des Kupplungsschlupfes eine gewisse Energie aufwenden, und zwar in diesem Beispiel zur Erzeugung des Drehfelds mit elektromagnetischem Schlupf. Um diese Verlustenergie zu minimieren, sind die Drehmomentübertrager, welche die elektromagnetische Kupplung trennt, vorzugsweise mit einer Überbrückungskupplung, insbesondere einer mechanischen Kupplung, verbindbar. Hierbei kann es sich z. B. um eine reibschlüssige oder — da ihr Einkuppeln durch entsprechende Steuerung immer bei verschwindendem Kupplungsschlupf möglich ist — vorteilhaft um eine formschlüssige Kupplung, z. B. eine Klauenkupplung handeln. Statt eine gesonderte Kupplung vorzusehen, können auch die beiden Läufer der Doppelmaschine bzw. die beiden Wirkeinheiten der Einzelmaschine durch Axialverschiebung miteinander in Reib- oder Formschluß bringbar sein.

Eine Reihe von Zusatzfunktionen der elektrischen Maschine sind in vorteilhafter Weise oder sogar ausschließlich mit gegen Drehung festgelegtem Ständer erzielbar. Um einige oder alle dieser Zusatzfunktionen auch mit der drehbaren Einzelmaschine zu erschließen, ist vorzugsweise die Wirkung wenigstens einer ihrer beiden elektromagnetischen Wirkeinheiten durch die Wirkung einer nicht-drehbaren Wirkeinheit ersetzbar. Die Wirkungersetzung kann erfolgen, wenn keine Kupplungsfunktion benötigt wird, also etwa wenn bei dem Fahrzeug der Gang herausgenommen ist (im Stand oder während des Schaltens) oder wenn die ggf. vorhandene Überbrückungskupplung geschlossen ist. Für die Art und Weise, wie diese Wirkungersetzung erfolgt, gibt es verschiedene vorteilhafte Möglichkeiten:

Bei einer ersten, sehr einfachen Möglichkeit erfolgt die Wirkungersetzung dadurch, daß wenigstens eine der drehbaren Wirkeinheiten, insbesondere die abtriebsseitige (d. h. die getriebeseitige), gegen Drehung festlegbar ist, insbesondere mit Hilfe einer mechanischen Bremse oder Kupplung. Es wird also nicht etwa die drehbare Wirkeinheit durch eine feststehende ersetzt, die verschiedenen Wirkungen werden vielmehr von ein- und derselben Wirkeinheit hervorgerufen, die nur festgelegt bzw. freigegeben wird. Die Festlegung kann unmittelbar oder mittelbar, etwa durch Festlegung des zugehörigen Drehmomentübertragers erfolgen. Eine abtriebsseitige Festlegung — die i. a. nur bei herausgenommenem Gang (insbesondere im Stand des Fahrzeugs) durchführbar ist — erschließt zwei Funktionen, nämlich einerseits die aktive Verringerung von Drehungleichförmigkeiten der (antriebsseitigen) Triebwelle sowie andererseits ein Starten des Antriebsaggregats im Zusammenlauf aus dem Stand (sog. Direkt-Starten).

Eine zweite Art der Wirkungersetzung erschließt weitere Funktionen im angetriebenen Zustand des Systems, und zwar bei Betrieb mit geschlossener Überbrückungskupplung und während des Schaltens. Die Wirkungersetzung erfolgt dadurch, daß wenigstens eine der drehbaren Wirkeinheiten von ihrem Drehmomentübertrager abkoppelbar ist und gegen Drehung festlegbar ist, insbesondere mit Hilfe einer oder mehrerer mechanischer Kupplungen. Auch hier werden die verschiedenen Wirkungen von ein- und derselben Wirk-

einheit hervorgerufen, die nur festgelegt bzw. mit ihrem Drehmomentübertrager gekoppelt wird. Der Unterschied zur ersten Art besteht in der zusätzlichen Abkoppelbarkeit der festlegbaren Wirkeinheit von ihrem Drehmomentübertrager. Dies erlaubt — im Gegensatz zur ersten Art — die Festlegung des Wirkelements auch bei drehendem zugehörigen Drehmomentübertrager, also auch im Antriebszustand des Systems. Die mechanischen Kupplungen zum Festlegen und Abkoppeln können vorteilhaft formschlüssig sein, da die festlegbare Wirkeinheit nach dem Abkoppeln durch die elektrische Maschine selbst zum Stillstand gebracht werden kann, so daß dann Ihre Festlegung durch eine formschlüssige Kupplung möglich ist. Entsprechendes gilt für die umgekehrte Richtung. Diese zweite Art erschließt die Funktion einer aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten der (antriebsseitigen) Triebwelle auch im Antriebszustand. Sie erlaubt ferner die Synchronisierung in Abstützung gegen das festgelegte Wirkelement auszuführen, was steuerungstechnisch einfacher als der o.g. Fall einer Abstützung gegen den mit veränderlicher Drehzahl drehenden antriebsseitigen Drehmomentübertrager. Eine Voraussetzung für letzteres ist jedoch, daß die Überbrückungskupplung (oder eine andere zusätzliche Kupplung) so angeordnet ist, daß sie eine Trennung des drehbar verbliebenen Wirkelements vom Antriebsaggregat erlaubt.

Die dritte Art der Wirkungsersetzung entspricht der zweiten Art vom Ergebnis her. Im Unterschied zu jener ist jedoch bei ihr die in ihrer Wirkung zu ersetzende elektromagnetische Wirkeinheit doppelt vorhanden, und zwar als drehbare und als nicht-drehbare Wirkeinheit. Die Wirkungsersetzung erfolgt dadurch, daß die drehbare Wirkeinheit elektromagnetisch unwirksam und die nicht-drehbare wirksam gemacht wird, vorzugsweise indem die Speisung mit drehmomenterzeugender bzw. -übertragender elektrischer Energie von der drehbaren auf die nicht-drehbare Wirkeinheit umgeschaltet wird. Vorteilhaft dient hierzu ein entsprechend umschaltbarer Stromrichter bzw. Wechselrichter.

Falls man bei dieser Maschine die zusätzlich zur ersten drehbaren Wirkeinheit vorhandene festliegende Wirkeinheit so ansteuert, daß sie gleichzeitig mit jener Wirkeinheit eine ihr gegenüber eigenständige Wirkung auf die zweite drehbare Wirkeinheit ausüben kann, erhält man eine Maschine mit weitergehenden Funktionsmöglichkeiten. Vorteilhaft erzielt man diese Ansteuerung, indem die erste drehbare und die nicht-drehbare Wirkeinheit eigenständig mit drehmomenterzeugender bzw. -übertragender elektrischer Energie gespeist werden, z. B. durch zwei im wesentlichen unabhängige Stromrichter bzw. Wechselrichter. Mit dieser Ausgestaltung ist es insbesondere möglich, auch während die elektromagnetische Kupplungsfunktion aktiviert ist (z. B. bei offener oder nicht vorhandener Überbrückungskupplung), Drehungleichförmigkeiten des antriebsseitigen Drehmomentübertragers aktiv zu verringern. Eine Voraussetzung hierfür ist, daß die zweite drehbare Wirkeinheit mit dem antriebsseitigen Drehmomentübertrager gekoppelt ist.

Vorteilhaft umfaßt die Kupplungsfunktion der elektrischen(n) Maschine(n) die Funktionen einer Anfahrkupplung und/oder Schaltkupplung. Bei einer Funktion als Anfahrkupplung muß die elektrische Maschine hohe Leistung aufbringen können, was eine entsprechende, große Dimensionierung des gesamten Systems erforderlich macht. Zudem kann der Energieüberschuß beim Anfahren mit großem Kupplungsschlupf recht große

Werte annehmen. Bei kleiner dimensionierten elektrischen Maschinen und ggf. nicht ausreichender Energiespeichermöglichkeit kann es daher vorteilhaft sein, die elektromagnetische Kupplungsfunktion auf die Schaltfunktion zu beschränken und die Anfahrkupplungsfunktion — bei überbrückter elektromagnetischer Kupplung — einer zusätzlich vorhandenen reibschlüssigen oder hydrodynamischen Kupplung zu überlassen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die elektrische Maschine als Überlastkupplung zu verwenden, d. h. daß auch die Funktion des Überlastschutzes von der elektrischen Maschine erzielt wird. Ferner kann die als Kupplung wirkende elektrische Maschine zur Schwingungsdämpfung verwendet werden. Dabei kann die Kupplung so eingestellt werden, daß sie die Drehmomentspitzen abnimmt und dadurch eine die Drehmoment-Ungleichförmigkeit verringernde Wirkung erzielt wird.

Auch zum Starten des Antriebsaggregats im Zusammenlauf aus dem Stand müssen relativ große Drehmomente aufgebracht werden. Als Alternative für den Fall kleinerer gelieferter Drehmomente dient die elektrische Maschine vorteilhaft als Schwungmassen-Starter mit elektromagnetisch kuppelbarer Schwungmasse. Dies ermöglicht ein Starten auch in Fällen, in denen die elektrische Maschine das nötige Drehmoment für ein Direkt-Starten nicht aufbringen kann. Als Schwungmasse dient vorzugsweise ein Teil der elektrischen Maschine selbst, z. B. deren abtriebsseitige Wirkeinheit, zusammen mit dem daran gekoppelten Drehmomentübertrager. Bei freigeschaltetem Gang läßt sich diese in Abstützung gegen die Massenträgheit der Triebwelle und die Kompression des Verbrennungsmotors elektromotorisch auf hohe Drehzahlen hochdrehen. Durch elektromagnetisches Einkuppeln mit Hilfe der elektrischen Maschine selbst wird die Schwungmasse schnell abgebremst und dadurch die Triebwelle derart beschleunigt, daß der Verbrennungsmotor startet. Vorteil gegenüber bekannten Schwungrad-Startern mit mechanischer Einkopplung des Schwungrads (siehe z. B. das Buch D. Henneberger "Elektrische Motorausstattung", Braunschweig 1990, Seiten 98—103) ist die Vermeidung von Kupplungsverschleiß und die genaue Steuerbarkeit des Einkuppelungsvorgangs.

Grundsätzlich hängt bei Fahrzeugen die — für die Fortbewegung des Fahrzeuges verantwortliche — Kraftübertragung vom Antriebsschlupf zwischen Reifen und Fahrbahn ab. Im allgemeinen laufen die Anfahr- bzw. Beschleunigungsvorgänge bei kleinen Schlupfwerten ab, bei denen eine Erhöhung des Schlupfes zunächst auch eine Erhöhung des ausnutzbaren Kraftschlusses ergibt. Bei einer weiteren Erhöhung reduziert sich jedoch der Kraftschluß wieder, so daß bei entsprechender Beschleunigung ein größer werdendes überschüssiges Antriebsmoment zu einer schnellen Drehzahlerhöhung eines Antriebsrades bzw. der Antriebsräder führt.

Eine Regelung des Antriebsschlupfes, d. h. eine sog. Antriebsschlupfregelung (ASR), verhindert ein derartig hervorgerufenes Durchdrehen der Antriebsräder und regelt den Antriebsschlupf auf zulässige Werte. Derartige Antriebsschlupfregelungen sind aus dem Stand der Technik bekannt (siehe z. B. "Kraftfahrtechnisches Taschenbuch", Herausgeber: Robert Bosch GmbH, Düsseldorf, 21. Auflage, 1991, Seite 555—559).

Die Regelung des Antriebsschlupfes wird — im Stand der Technik — derart durchgeführt, daß bei Erreichen eines Grenzwertes des Antriebsschlupfes oder einer zeitlichen Änderung (zeitliche Ableitung) des Antriebs-

schlupfes das Antriebsmoment verringert wird. Die Verringerung des Antriebsmoments wird entweder durch Verstellung des Verbrennungsmotors, also durch Drosselklappenverstellung oder durch Zündzeitpunktverstellung, oder durch Betätigen einer oder mehrerer Radbremse(n) realisiert. Auch eine Kombination beider Maßnahmen ist bekannt. Insbesondere können zusätzlich zur Verbrennungsmotorverstellung, die bei Überschreiten eines ersten Grenzwertes des Antriebsschlupfes erfolgt, die Radbremsen betätigt werden, wenn ein zweiter, höherer Grenzwert des Antriebsschlupfes erreicht wird.

Nachteilig an diesen bekannten Antriebsschlupfregelungen ist, daß einerseits die Motorverstellung langsam und träge erfolgt und andererseits die gesamte Antriebsschlupfregelung schlecht steuerbar ist, d. h. ein bestimmter zeitlicher Verlauf der Antriebsmomentverringung praktisch nicht erzielt werden kann.

Einem weiteren Aspekt der Erfindung liegt daher das technische Problem zugrunde, bekannte Antriebsschlupfregelungen weiterzubilden und zu verbessern.

Dieses Problem wird gelöst durch ein System, mit einer Antriebsschlupfregelung, bei welchem die (bzw. eine) elektrische Maschine derart ausgelegt ist, daß mit ihr eine Antriebsschlupfverringung durch Verkleinerung des Antriebsmoments (des Antriebsaggregats) herbeiführbar ist, insbesondere durch Bremswirkung und/oder — bei als Kupplung wirkender elektrischer Maschine — durch Kupplungsschlupfwirkung.

Die erfindungsgemäße Antriebsschlupfverringung wird im allgemeinen erst aktiv, wenn — ähnlich wie im Stand der Technik — eine bestimmte Bedingung erfüllt ist. Diese Bedingung kann das Überschreiten eines Grenzwertes des Antriebsschlupfes oder eines Grenzwertes der zeitlichen Änderung des Antriebsschlupfes sein. Die Bedingung kann aber auch komplexer definiert werden, etwa im Sinne einer Kombination beider oben genannten Bedingungen oder aber auch anderer Bedingungen.

Wird nun eine bestimmte Bedingung erfüllt, wird mittels der elektrischen Maschine kurzfristig (und nicht andauernd) das auf die Antriebsräder wirkende Antriebsmoment verringert.

Die Vorteile einer derartigen Antriebsschlupfregelung liegen darin, daß die Antriebsschlupfregelung schnell und nicht träge arbeitet und somit die Verringerung des Antriebsschlupfes in idealerweise steuerbar ist. Somit wird insgesamt auch die Verkehrssicherheit erhöht.

Weitere vorteilhafte Weiterbildungen dieser Antriebsschlupfregelungen mit elektrischer Maschine sind nachfolgend aufgeführt.

1. Die Antriebsschlupfregelung mit elektrischer Maschine ersetzt die aus dem Stand der Technik bekannte Antriebsschlupfregelung mit Motorverstellung oder Radbremsung oder wird in Kombination mit der aus dem Stand der Technik bekannten Antriebsschlupfregelung mit Motorverstellung und/oder Radbremsung verwendet. Diese verschiedenen Maßnahmen zur Antriebsschlupfverringung müssen nicht gleichzeitig durchgeführt werden, sondern können nacheinander einsetzend — z. B. bei Überschreiten weiterer Grenzwerte — ausgeführt werden, insbesondere wenn einzelne Maßnahmen nicht wirksam genug sind. Beispielsweise können die — in besonderem Maße dem Verschleiß unterliegenden — Radbrem-

sen erst in besonders kritischen Situationen eingesetzt werden.

2. Die Verringerung des Antriebsmoments bzw. ein Bremsen der die Antriebsräder antreibenden Welle kann insbesondere wie nachstehend ausgeführt erfolgen:

a) Die elektrische Maschine kann derart ausgebildet sein, daß sie als Wirbelstrombremse verwendbar ist. Somit kann im Betrieb der elektrischen Maschine als Wirbelstrombremse das Antriebsmoment verringert werden.

b) Die elektrische Maschine kann generatorisch betrieben werden, so daß der erzeugte Strom entweder z. B. über Heizwiderstände in Wärme umgesetzt (verheizt) oder zur Wiederverwendung gespeichert wird. Auf diese Weise kann eine Energierückgewinnung stattfinden. Dies führt somit zu einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades.

c) Zwischen die elektrische Maschine und das Antriebsaggregat kann eine mechanische Kupplung geschaltet werden, die automatisch betätigbar ist und teilweise oder ganz geöffnet wird, wenn das Antriebsmoment verringert werden soll. Dann wirkt nur die elektrische Maschine bremsend und das Antriebsaggregat ist im wesentlichen von den Antriebsrädern abgetrennt.

3. Die Verringerung des Antriebsschlupfes erfolgt durch Zulassen eines Kupplungsschlupfes in der als Kupplung wirkenden elektrischen Maschine bzw. durch Vergrößern eines bereits vorhandenen Kupplungsschlupfes. Falls darüber hinaus die als Kupplung wirkende elektrische Maschine eine mechanische Überbrückungskupplung aufweist, wird diese zunächst gelöst und dann erst der Kupplungsschlupf zugelassen und vergrößert.

Grundsätzlich kann die Verringerung des Antriebsschlupfes nicht nur durch den Kupplungsschlupf — also passiv — reguliert werden, sondern von der elektrischen Maschine auch aktiv durch Erzeugen eines bremsenden — auf die die Antriebsräder antreibende Welle wirkenden — Gegendrehmoments.

Die Ausgestaltungen, welche die Antriebsschlupfregelung betreffen, sind ersichtlich auch ohne die Merkmale der Ansprüche 1 bis 32 technisch vorteilhaft. Die Anmelderin behält sich daher ausdrücklich eigenständigen Schutz hierfür gemäß Anspruch 33 vor.

Die Erfindung ist auch auf ein Verfahren zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten einer Welle, insbesondere der Triebwelle eines Verbrennungsmotors gerichtet, mit wenigstens einer elektrischen Maschine, insbesondere einer Dreh- oder Wanderfeldmaschine, die mit der Welle gekoppelt oder koppelbar ist, und wenigstens einem Wechselrichter zum Erzeugen der für die magnetischen Felder der Maschine benötigten Spannungen und/oder Ströme variabler Frequenz, Amplitude und/oder Phase, wobei bei dem Verfahren durch wenigstens eine Steuereinrichtung der Wechselrichter und damit die elektrische Maschine so gesteuert wird, daß diese positiven und negativen Drehungleichförmigkeiten der Welle entgegenwirkt (Anspruch 34).

Das Verfahren kann vorteilhaft mit einem System nach einer oder mehreren der oben erläuterten Ausgestaltungen durchgeführt werden (Anspruch 35). Bezüg-

lich einzelner Merkmale und Vorteile des Verfahrens wird auf die obigen Erläuterungen zum System verwiesen, die sich vollinhaltlich auch auf das Verfahren in seinen verschiedenen Ausgestaltungen beziehen.

Die Gegenstände der Ansprüche 4—33 und 35 können auch bei einem System bzw. Verfahren zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten einer Welle vorteilhaft sein, bei dem die elektrische Maschine nur positiven oder nur negativen Drehungleichförmigkeiten entgegenwirkt. Es wird daher der Vorbehalt erklärt, Patentansprüche auf diese Gegenstände unter Weglassung des jetzt in den Ansprüchen 1 bzw. Anspruch 34 enthaltenen Merkmals "positive und negative (Drehungleichförmigkeiten)" zu richten.

Im übrigen werden in der gesamten vorliegenden Beschreibung Zahlenangaben "x" im Sinn von "wenigstens x", und nur vorzugsweise im Sinn von "genau x" verstanden.

Die Erfindung wird nun anhand von Ausführungsbeispielen und der angefügten schematischen Zeichnung näher erläutert. In der Zeichnung zeigen:

Fig. 1 eine schematische beispielhafte Darstellung der Funktionsweise des Systems zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten;

Fig. 2 eine unmaßstäblich-schematische Darstellung einer Ausführungsform des Systems;

Fig. 3 eine schematische Schnittdarstellung einer elektrischen Maschine mit Schnittebene senkrecht zur Axialrichtung zur Veranschaulichung verschiedener bei dem System verwendbaren Maschinentypen;

Fig. 4 eine schematische Schnittdarstellung einer elektrischen Maschine mit integrierter Reibkupplung mit Schnittebene in Axialrichtung;

Fig. 5 einen schematischen Schaltplan eines bei dem System verwendeten Wechselsrichters;

Fig. 6 eine Fig. 2 entsprechende Darstellung einer anderen Ausführungsform des Systems;

Fig. 7 eine schematische Darstellung eines Steuerablaufs bei Zylinderabschaltbetrieb;

Fig. 8 eine schematische Darstellung eines Steuerablaufs einer Start-Stop-Automatik;

Fig. 9 eine schematische Darstellung einer elektrischen Doppelmaschine;

Fig. 10 eine Darstellung einer Doppelmaschine gemäß Fig. 1 mit gemeinsamem Ständerkörper;

Fig. 11 eine schematische Darstellung einer elektrischen Maschine mit drehbaren elektromagnetischen Wirkeinheiten;

Fig. 12 eine schematische Darstellung einer anderen elektrischen Maschine mit drehbaren elektromagnetischen Wirkeinheiten;

Fig. 13 eine schematische Darstellung einer weiteren elektrischen Maschine mit relativdrehbaren elektromagnetischen Wirkeinheiten und einer feststehenden Wirkeinheit;

Fig. 14 eine Fig. 2 entsprechende Darstellung einer Ausführungsform des Systems mit der elektrischen Maschine von Fig. 13.

In den Figuren tragen im wesentlichen funktionsgleiche Teile gleiche Bezugszeichen.

Fig. 1a veranschaulicht (mit durchgezogener Linie) die Drehzahl  $n$  einer Welle als Funktion des Kurbelwellenwinkels  $\varphi$ . Die Welle führt um eine mittlere Drehzahl (hier 3000 Umdrehungen pro Minute) periodisch Drehzahlsschwankungen zu kleineren und größeren Drehzahlen hin aus, welche in diesem idealisierten Beispiel insgesamt einen im wesentlichen sinusförmigen Verlauf haben. Bei der Welle handelt es sich beispielsweise um die

Kurbelwelle eines Vierzylinder-Viertakt-Verbrennungsmotors eines Kraftfahrzeugs, die in der zweiten Ordnung (d. h. bei einer Frequenz von 100 Hz) eine relativ große, von den Gas- und Massenkräften herrührende Drehungleichförmigkeit aufweist. Zur Veranschaulichung ist auch das für eine Umdrehung der Welle benötigte Winkelintervall eingezeichnet. Im allgemeinen treten bei einer Welle außerdem (hier nicht dargestellte) Drehungleichförmigkeiten höherer Ordnungen und solche stochastischer Natur auf. Ihr Verlauf ist also i. a. nicht sinusförmig.

Im wesentlichen proportional zu den Drehungleichförmigkeiten sind Schwankungen des Drehmoments  $M_v$  des Verbrennungsmotors um ein mittleres Drehmoment. Die durchgezogene Linie in Fig. 1a veranschaulicht damit auch den Verlauf des Motor-Drehmoments  $M_v$  als Funktion des Kurbelwellenwinkels  $\varphi$ .

Fig. 1b veranschaulicht das Gesamt-Drehmoment  $M_e$  als Funktion des Wellenwinkels  $\varphi$ , das von einer mit der Welle gekoppelten elektrischen Maschine aufgebracht wird. Der Verlauf des Maschinendrehmoments  $M_e$  entspricht weitgehend dem der Drehungleichförmigkeit und des Motor-Drehmoments  $M_v$ , ist jedoch entgegengesetzt gerichtet. D. h., bei einer Drehungleichförmigkeit zu höheren Drehzahlen hin (sog. positive Drehungleichförmigkeit) erzeugt die elektrische Maschine ein die Welle bremsendes Drehmoment (sog. negatives Drehmoment), wohingegen sie bei einer Drehungleichförmigkeit zu niederen Drehzahlen hin (sog. negative Drehungleichförmigkeit) ein antreibendes Drehmoment (sog. positives Drehmoment) erzeugt. Der Betrag des Drehmoments  $M_e$  ist so gewählt, daß die Drehungleichförmigkeit — und die zu ihr proportionale Schwankung des Drehmoments  $M_v$  — durch dessen Wirkung wesentlich verringert wird oder sogar praktisch verschwindet, wie in Fig. 1a durch die gestrichelte Linie veranschaulicht ist.

Bei der in Fig. 1b gezeigten Betriebsweise sind die negativen und positiven Drehmomentextrema betragsmäßig gleich groß. Die bei einer Bremsphase gewonnene Energie ist also im wesentlichen gleich groß wie die bei der folgenden Antriebsphase auf zuwendende Energie. Der Energiefluß nach außen ist somit Null, es wird nur im Inneren des System zeitweise Bremsenergie zwischengespeichert. Das System arbeitet also in dieser Betriebsweise als reiner Drehungleichförmigkeits-Verringerer mit schnell variierendem Drehmoment, ohne Erzeugung eines Zusatz-Drehmoments.

Ein Beispiel für eine demgegenüber modifizierte Betriebsweise des Systems mit Zusatz-Drehmoment ist in Fig. 1c gezeigt: Der zeitliche Verlauf des Gesamt-Drehmoments  $M_e$  entspricht dem von Fig. 1b, es ist jedoch global um einen bestimmten Betrag  $\Delta M_e$  (den sog. Hub) in negative Richtung verschoben. Der Hub  $\Delta M_e$  wird im allgemeinen langsam variieren, in dem hier dargestellten kurzen Zeitrahmen von ungefähr einer Umdrehungsperiode ist er jedoch in guter Näherung konstant. Der Hub  $\Delta M_e$  ist hier kleiner als die Amplitude der schnellen Variation des Drehmoments, so daß das Gesamt-Drehmoment  $M_e$  alternierend positive und negative Werte annimmt. Gemittelt über die schnelle Drehmomentvariation erhält man ein konstantes Drehmoment  $-\Delta M_e$ . Dem Verbrennungsmotor wird also im Mittel mechanische Energie entzogen, die weitgehend in elektrische Energie umgewandelt und dem System entnommen wird. Die elektrische Maschine hat also in dieser Betriebsart neben der Funktion als Drehungleichförmigkeits-Verringerer die Funktion eines elektri-



schen Generators, der als Bremse wirken kann und Strom z. B. zum Ausgleichen der Betriebsverluste des Systems, zum Laden der Fahrzeugbatterie und/oder zum Betreiben elektrischer Verbraucher liefern kann.

Falls der Hub  $\Delta Me$  größer als die Amplitude zur Verringerung der Drehungleichförmigkeit ist, wirkt die elektrische Maschine nur noch bremsend und nicht mehr antreibend, wobei die Bremswirkung in ihrem Betrag entsprechend Fig. 1b und 1c gegenphasig zur Drehungleichförmigkeit variiert.

Allein durch eine entsprechende Einstellung der (Software-)Steuerung der elektrischen Maschine — ohne jegliche konstruktive (Hardware-)Änderungen — sind kleine und sehr große Generatorleistungen einstellbar. Begrenzend wirkt nur die Größe der elektrischen Maschine. Damit kann ein und der selbe Maschinentyp beispielsweise für kleine und große Kraftfahrzeugtypen ohne konstruktive Anpassung verwendet werden.

Der globale Drehmomentverlauf kann auch in positiver Richtung verschoben sein (positiver Hub). Die elektrische Maschine arbeitet dann neben ihrer Funktion als Drehungleichförmigkeits-Verringerer als (antreibender) Motor, z. B. um den Verbrennungsmotor bei einer Fahrzeugbeschleunigung zu unterstützen.

Das in Fig. 2 dargestellte Antriebssystem eines Kraftfahrzeugs, z. B. eines Personenkraftwagens, weist als Antriebsaggregat einen Verbrennungsmotor 1 auf, bei dem es sich beispielsweise um einen Vierzylinder-Viertakt-Otto- oder Dieselmotor handelt. Das vom Verbrennungsmotor 1 erzeugte Drehmoment kann über einen Antriebsstrang 2 auf Antriebsräder 3 übertragen werden. In Abtriebsrichtung ist im Antriebsstrang 2 nach dem Verbrennungsmotor 1 zunächst eine elektrische Maschine 4 angeordnet. Auf diese folgen eine Fahrkupplung 5, ein Getriebe 6 und ein Achsantrieb 7, welcher das Drehmoment auf die Antriebsräder 3 überträgt. Bei der Kupplung 5 und dem Getriebe 6 kann es sich um eine Reibungskupplung und ein Schaltgetriebe handeln; alternativ sind z. B. eine automatische Kupplung oder Wandlerkupplung, jeweils mit Schaltgetriebe oder automatischem Getriebe möglich. Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen ist im Antriebsstrang 2 zwischen Verbrennungsmotor 1 und elektrischer Maschine 4 eine weitere (durch Steuerung betätigte) Kupplung angeordnet, um beim Bremsen mit der elektrischen Maschine 4 einen Mitlauf des Verbrennungsmotors 1 zu vermeiden.

Die elektrische Maschine 4 — hier eine Drehstrom-Wanderfeld-Maschine in Asynchron- oder Synchron-Bauart — umfaßt einen Ständer 8 und einen Läufer 9. Ersterer stützt sich drehfest gegen den Verbrennungsmotor 1, ein (nicht gezeigtes) Fahrzeugchassis oder ein (nicht gezeigtes) Kupplungsgehäuse ab, wohingegen letzterer direkt auf einer Triebwelle (Kurbelwelle) 10 des Verbrennungsmotors 1 oder einer Verlängerung hiervon sitzt und mit dieser drehfest gekoppelt ist. Die Triebwelle 10 und der Läufer 9 rotieren also gemeinsam, ohne Zwischenschaltung eines Getriebes.

Die elektrische Maschine 4 erfüllt mehrere Funktionen: Sie fungiert einerseits als Drehungleichförmigkeits-Verringerer, wie im Zusammenhang mit Fig. 1 bereits erläutert wurde. Andererseits fungiert sie als Generator zur Ladung einer Fahrzeugbatterie 11 und zur Versorgung elektrischer Verbraucher und ersetzt damit eine herkömmlicherweise im Kraftfahrzeug vorhandene Lichtmaschine. Die Generatorfunktion kann ferner zum Abbremsen des Fahrzeugs oder des Verbrennungsmotors 1 dienen. Außerdem kann die elektrische Ma-

schine 4 als Zusatzmotor ("Booster") fungieren, z. B. um den Verbrennungsmotor beim Beschleunigen des Fahrzeugs zu unterstützen. Auch dient sie als Starter für den Verbrennungsmotor und kann somit auch einen herkömmlicherweise beim Kraftfahrzeug gesondert vorgesehenen Starter ("Anlasser") ersetzen. Schließlich fungiert sie aufgrund des Massenträgheitsmoments des Läufers 9 als Schwungrad und kann so das bei herkömmlichen Kraftfahrzeugen i. a. vorhandene, auf der Kurbelwelle sitzende Schwungrad ersetzen.

Die elektrische Maschine 4 ist durch eine Sprühflüssigkeitskühlung 12 innengekühlt. Nach Durchlaufen eines Kühlers 13 und einer Pumpe 14 wird das Kühlfluid — hier ein geeignetes Öl — an den Läufer 9, und zwar in der Nähe von dessen Rotationsachse, gesprüht. Es wandert aufgrund der Läuferrotation fliehkraftbedingt nach außen und kühlt dabei Läufer 9 und Ständer 8, und verläßt dann ein Gehäuse 15 der elektrischen Maschine 4, um in einem geschlossenen Kreislauf wieder in den Kühler 13 einzutreten. Der Kühlmittelfluß erfolgt verlustleistungs- und drehzahlabhängig durch entsprechende Steuerung der Pumpe 14, derart, daß sich jeweils im wesentlichen nur eine gerade benötigte Mindestmenge des Kühlfluids im Inneren des Gehäuses 15 befindet. Ein (nicht gezeigtes) Ausgleichsgefäß erlaubt diese Variation der Kühlfluidmenge im Gehäuse 15. Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen ist die elektrische Maschine (oder nur der Läufer) in ein Kupplungs- und/oder Getriebegehäuse integriert und wird durch ein darin befindliches Schmier- und/oder Kühlfluid (z. B. Kupplungs- oder Getriebeöl) mit gekühlt.

Die elektrische Maschine 4 ist außerdem mit einem Drehtransformator 16 (sog. Resolver) ausgerüstet, der vorzugsweise mehr als 8 Pole, hier z. B. 12 Pole aufweist. Er besteht aus zwei benachbart angeordneten Leiterplatten, von denen eine feststeht und die andere sich mit der Triebwelle 10 dreht. Die Leiterplatten tragen auf ihren zugewandten Oberflächen durch Leiterbahnen gebildete Windungen, derart daß sich ein drehwinkelabhängiges Transformator-Übersetzungsverhältnis ergibt. Der Drehtransformator 16 arbeitet nach dem Transponder-Prinzip: Die feststehenden Windungen (feststehende Platine) werden aktiv mit Strom/Spannung beaufschlagt und strahlen elektromagnetische Energie zu den drehbaren Windungen (drehbare Platine) hin ab. Letztere strahlen einen Teil dieser Energie wieder zurück, wobei dieser Teil aufgrund des drehwinkelabhängigen Übertragungsverhältnisses vom Drehwinkel abhängt. Der rückgestrahlte Teil erzeugt in den feststehenden Windungen ein drehwinkelabhängiges Signal. Eine Auswertung dieses Signals liefert den momentanen Drehwinkel der Triebwelle 10 mit einer Genauigkeit von wenigstens 0,5 Grad.

Ein Wechselrichter 17 liefert dem Ständer 8 der elektrischen Maschine 4 bei einer sehr hohen Taktfrequenz (z. B. 100 kHz) sinusbewehrt pulsweitenmodulierte Spannungsimpulse, die unter der Wirkung der Maschineninduktivität im wesentlichen sinusförmige Dreiphasen-Ströme ergeben, deren Amplitude, Frequenz und Phase frei vorwählbar ist.

Der Wechselrichter 17 ist ein Spannungszwischenkreis-Wechselrichter und umfaßt drei Baugruppen: einen Gleichspannungsumsetzer 18 (Eingangsbaugruppe), welcher Gleichspannung von einem niedrigen Niveau (hier 12 V) auf ein höheres Zwischenkreisniveau (hier 350 V) und in umgekehrter Richtung umsetzt, einen elektrischen Zwischenkreisspeicher 19, hier ein Kondensator bzw. eine Anordnung parallel geschalteter



Kondensatoren, und einen Maschinenwechselrichter 21 (Ausgangsbaugruppe), welcher aus der Zwischenkreis-Gleichspannung die (getaktete) Dreiphasen-Wechselspannung variabler Amplitude, Frequenz und Phase erzeugen kann oder — bei generatorischem Betrieb der elektrischen Maschine 4 — derartige beliebige Wechselspannungen in die Zwischenkreis-Gleichspannung umsetzen kann.

Die drei Baugruppen 18, 19, 20 des Wechselrichters 17 sind in einem metallischen Gehäuse 21 hermetisch eingeschlossen, welches mit einem geeigneten Siedekühlmittel gefüllt ist. Bei diesem handelt es sich z. B. um einen Fluorkohlenwasserstoff, der bei einem geeigneten Druck (etwa zwischen 50 mbar und 3 bar) einen geeigneten Siedepunkt, z. B. bei 60°C, hat. Verdampftes Siedekühlmittel kann in einem Kondensationskühler 22 kondensieren und in flüssiger Form in einem geschlossenen Kreislauf in das Gehäuse 21 zurückkehren. Das Gehäuse 21 mit dem Kühlkreislauf ist hermetisch dicht.

Der Gleichspannungsumsetzer 18 ist niederspannungsseitig mit der Fahrzeugbatterie 11 und verschiedenen Niederspannungsverbrauchern 23, wie beispielsweise Beleuchtung und elektronische Geräte, verbunden. Der Wechselrichter 17 kann einerseits Strom auf niedrigem Spannungsniveau zum Laden der Fahrzeugbatterie 11 und Versorgen der Niederspannungsverbraucher 23 liefern, andererseits kann er der Fahrzeugbatterie 11 Strom auf niedrigem Spannungsniveau zum Starten des Verbrennungsmotors 1 entnehmen.

Der Zwischenkreisspeicher 19 ist verbunden mit einem externen Zusatzspeicher 24, bei dem es sich um einen elektrischen Speicher, hier eine Zusatzkapazität 25, und/oder einen Schwungradspeicher 26 handeln kann. Der Zusatzspeicher 24 hat in erster Linie die Aufgabe, die beim Drehungleichförmigkeits-Verringern in einer Bremsphase gewonnene Energie zwischenspeichern und für die anschließende Antriebsphase wieder abzugeben. Daneben kann er auch der Speicherung derjenigen Energie dienen, die bei anderen, durch die elektrische Maschine 4 vermittelten Bremsvorgängen anfällt. Schließlich kann er die Fahrzeugbatterie 11 beim Startvorgang des Verbrennungsmotors 1 entlasten, indem dieser Energie nur langsam entnommen und im Zusatzspeicher 24 gespeichert wird. Hier steht sie dann für eine schnelle Entnahme beim Startvorgang zur Verfügung.

Hingegen hat der (innere) Zwischenkreisspeicher 19 im wesentlichen die Aufgabe, der Maschinen-Wechselrichtergruppe 20 Spannung mit der für das Takten notwendigen hohen Flankensteilheit — also schnell — zu liefern. Er braucht dazu keine sehr hohe Kapazität (er hat z. B. 2 µF), vorteilhaft für die Schnelligkeit sind vielmehr geringe Zuleitungsinduktivitäten, was durch die Anordnung im Inneren des Wechselrichters 17 sichergestellt ist (und zwar vorzugsweise auf derselben Platine, auf der auch die elektronischen Schalter des Maschinen-Wechselrichters 20 angeordnet sind). Der Zusatzspeicher 24 kann hingegen relativ langsam arbeiten, so daß hier die Zuleitungskapazitäten aufgrund der externen Anordnung nicht stören. Die Zusatzkapazität 25 kann insbesondere 50 bis 5000 mal größer sein (sie ist hier z. B. 4,7 mF für die Speicherung der Drehungleichförmigkeits-Energie) als die des Zwischenkreisspeichers 19.

Noch größere Speicherkapazitäten sind mit dem Schwungradspeicher 26 erreichbar, der hier eine eigene wechselrichtergesteuerte elektrische Maschine 27 und eine damit gekoppelte Schwungmasse 28 umfaßt. Letztere kann durch ein gesondertes Schwungrad gebildet

oder in den Läufer der elektrischen Maschine 27 integriert sein. Das Massenträgheitsmoment der Schwungmasse 28 beträgt vorzugsweise 0,001 bis 0,1 kgm<sup>2</sup>. Es ist auch möglich, in dem Schwungradspeicher 26 ein Mehrfaches der zum Starten des Verbrennungsmotors 1 benötigten Energie zu speichern und ihm zum Starten schnell (d. h. in weniger als einer Sekunde) die jeweils nötige Startenergie zu entnehmen.

Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen ist kein gesonderter Zusatzspeicher 24 vorgesehen. Hier ist der Zwischenkreisspeicher 19 so dimensioniert und ggf. außerhalb des Wechselrichters 17 angeordnet, daß er die Funktionen des Zusatzspeichers 24 mit übernehmen kann.

Der Zwischenkreis mit seinem hohen Spannungsniveau (hier 350 V) versorgt verschiedene Hochleistungsverbraucher, wie eine Klimamaschine 29 und Servoantriebe 30 mit elektrischer Energie. Während derartige Hochleistungsverbraucher herkömmlicherweise durch mechanische Kopplung vom Verbrennungsmotor 1 angetrieben werden, erlaubt das hier zur Verfügung stehende hohe Spannungsniveau einen wirkungsgradmäßig günstigeren, rein elektrischen Antrieb.

Eine Steuereinrichtung 31 gibt dem Wechselrichter 17 durch entsprechende Ansteuerung seiner Halbleiterschalter zu jedem Zeitpunkt vor, welche Amplitude, Frequenz und Phase die von ihm zu erzeugende Wechselspannung haben soll. Die Steuereinrichtung 31, die beispielsweise durch ein entsprechend programmiertes Mikrocomputer-System gebildet sein kann, bestimmt zunächst den Betrag und die Richtung des Drehmoments, welches die elektrische Maschine 4 zu einem bestimmten Zeitpunkt erzeugen soll. Sie kann dies z. B. mit Hilfe einer Kennfeldsteuerung tun, indem sie als Eingangsinformation vom Drehtransformator 16 die Winkelstellung der Triebwelle 10, die momentane mittlere Drehzahl und ggf. weitere Betriebsparameter, wie z. B. die Drosselklappenstellung, erhält und aus einem gespeicherten Kennfeld die momentan zu erwartende Drehungleichförmigkeit in Abhängigkeit von diesen Betriebsparametern ermittelt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die tatsächlich momentan vorliegende Drehungleichförmigkeit zu ermitteln, z. B. durch Berechnung der momentanen Drehgeschwindigkeit auf der Grundlage der vom Drehtransformator 16 gelieferten Information und/oder durch Auswertung der momentan im Verbrennungsmotor 1 vorliegenden Gasdrücke, welche mit Hilfe von Gasdrucksensoren 32 detektierbar sind, sowie durch Erfassung der momentanen Drehmoments des Verbrennungsmotors 1 mit Hilfe einer (nicht gezeigten) Drehmomentnabe im Antriebsstrang. Möglich ist auch eine Kombination von Regelung und Steuerung. Aus dem so ermittelten Wert für die momentane Drehungleichförmigkeit wird ein entsprechender (gegenphasiger) Wert für das schnell variierende Soll-Drehmoment der elektrischen Maschine 4 abgeleitet, dem ggf. ein positives oder negatives Zusatz-Drehmoment gewünschter Stärke additiv überlagert wird. Zum Starten des Verbrennungsmotors 1 kann das Soll-Drehmoment auf der Grundlage gespeicherter Werte bestimmt werden, die den zeitlichen Soll-Verlauf der Drehzahl oder des Drehmoments der elektrischen Maschine 4 während des Startvorgangs vorgeben, ggf. ergänzt durch eine Messung dieser Größen und eine rückgekoppelte Regelung, welche die Einhaltung der Vorgaben sicherstellt.

In einem zweiten Schritt bestimmt die Steuereinrichtung 31, welche Amplitude, Frequenz und Phase der

Spannung bzw. des Stroms vom Wechselrichter 17 bereitgestellt werden muß, damit die elektrische Maschine 4 dieses Soll-Gesamtdrehmoment herbeiführt. Diese Bestimmung erfolgt bei der elektrischen Asynchronmaschine auf der Grundlage einer feldorientierten Regelung, welche auf einer Modellrechnung der elektrischen Maschine 4 beruht und als Eingangsinformation im wesentlichen die meßbaren elektrischen Ständergrößen (Amplitude, Frequenz und Phase von Strom und Spannung) und die momentane mittlere Läuferdrehzahl verwendet.

In Fig. 2 ist die Steuereinrichtung 31 als außerhalb des Wechselrichtergehäuses 21 angeordnet dargestellt. Um die Zuleitungsinduktivitäten gering zu halten und auch an der Siedebadkühlung zu partizipieren, ist sie jedoch bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen im Inneren des Wechselrichtergehäuses 21 angeordnet.

Die Steuereinrichtung 31 teilt verschiedene, zur Erfüllung ihrer Steueraufgaben dienende Sensoren bzw. davon abgeleitete Sensorinformationen mit einem Motorsteuergerät 33 zur Steuerung des Verbrennungsmotors 1. Im einzelnen handelt es sich z. B. um den Drehtransformator 16 (Winkellagegeber), die Gasdrucksensoren 32, daneben (nicht gezeigte) Sensoren zur Erfassung der mittleren Drehzahl, des Lastzustandes des Verbrennungsmotors 1 (z. B. über die Drosselklappenstellung) und dessen Drehmoments (z. B. mit Hilfe einer Drehmomentnabe).

Außerdem kommuniziert die Steuereinrichtung 31 mit einer Vielzahl weiterer Steuergeräte: ein (nicht gezeigtes) Energieverbrauchs-Steuergerät gibt an, wieviel Energie zum Laden der Fahrzeugbatterie 11, zur Versorgung der Niederspannungsverbraucher 23 und der Hochleistungsverbraucher 29, 30 benötigt wird, so daß die Steuereinrichtung 31 eine entsprechende globale Drehmomentverstellung  $\Delta M_e$  (siehe Fig. 1c) veranlassen kann. Das Motorsteuergerät 33 gibt der Steuereinrichtung 31 vor, ob die elektrische Maschine 4 zusätzlich zu ihrer Schwingungsverringerungs-Funktion fahrzeugbeschleunigend oder -bremsend wirken soll, so daß diese eine entsprechende globale Drehmomentverschiebung  $\Delta M_e$  veranlassen kann und ggf. die Drehungleichförmigkeits-Verringerungsfunktion vorübergehend abschalten kann. Entsprechend gibt ein ASR-Steuergerät 34 (ASR = Anti-Schlupf-Regelung) der Steuereinrichtung 31 bei Vorliegen von Antriebsschlupf vor, daß die elektrische Maschine 4 vorübergehend als generatorische Bremse wirken soll, ggf. bevor das ASR-Steuergerät bei verbleibendem Antriebsschlupf als massivere Maßnahme ein Einbremsen der betroffenen Antriebsräder durch die Radbremse veranlaßt. Zusätzlich kann das ASR-Steuergerät seine Schlupfinformation an das Motorsteuergerät 33 übergeben, um außerdem eine Verringerung des Verbrennungsmotor-Drehmoments zu veranlassen. Das Motorsteuergerät 33 führt auch eine automatische Start-Stop-Steuerung durch und gibt der Steuereinrichtung 31 vor, ob die elektrische Maschine 4 den Verbrennungsmotor 1 starten soll.

Bei jeder Art von Bremsen gewonnene Energie wird im Zusatzspeicher 24 gespeichert, um zum späteren Antreiben der elektrischen Maschine 4 wiederverwendet oder der Fahrzeugbatterie 11 zugeleitet zu werden.

Die in Fig. 3 näher dargestellte elektrische Maschine 4 ist bürsten- bzw. schleiferlos und damit verschleißfrei. Sie hat einen Außendurchmesser von ungefähr 250 mm und eine Länge in Axialrichtung von 55 mm und erbringt bei einem Gewicht von 10–15 kg ein Dauerdrehmoment von ca. 50 Nm und ein Spitzendrehmoment von

ca. 150 Nm. Sie kann Drehzahlen erreichen, die den Spitzendrehzahlen üblicher Verbrennungsmotoren (ca. 6000 bis 10000 U/min) entspricht und ist drehzahlfest bis 14000 U/min. Die elektrische Maschine 4 hat einen außenliegenden Ständer 8, welcher Nuten 35 in Richtung der Triebwelle 10 (Axialrichtung) aufweist. Der Ständer 8 trägt eine Drei-Phasen-Wicklung 36, die so ausgebildet ist, daß sie bei Beaufschlagung mit Drei-Phasen-Strom zwölf Pole ausbildet. Pro Pol sind drei Nuten 35, insgesamt also sechsunddreißig Nuten 35 vorhanden. (Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen sind pro Pol neun Nuten vorhanden.) Die Pole laufen mit der Drehstrom-Oszillation in einer Kreisbewegung im Ständer 8 um. Für einen bestimmten Zeitpunkt ist ihre momentane Lage durch Pfeile, welche die Bezugszeichen "S" (für Südpol) und "N" (für Nordpol) tragen, veranschaulicht. Ein die Nuten 35 nach außen abschließender Rücken 37 ist in Radialrichtung relativ dünn, seine Dicke beträgt (an der Stelle einer Nut 35) vorzugsweise 1–15 mm. Der Ständer 8 ist aus dünnen Statorblechen (die Dicke beträgt hier 0,25 mm) aus einem Material mit niedrigen Ummagnetisierungsverlusten (hier kleiner als 1 W/kg bei 50 Hz und einem Tesla) aufgebaut, mit senkrecht zur Axialrichtung verlaufenden Blechebenen.

Der innenliegende Läufer 9 ist bei der Asynchronmaschine als Käfigläufer mit im wesentlichen in Axialrichtung verlaufenden Käfigstäben, die jeweils stirnseitig mit einem Kurzschlußring 38 verbunden sind, ausgebildet. Beim der Synchronmaschine trägt der Läufer 9 eine entsprechende Zahl von Polen wie der Ständer 8 (hier zwölf Pole), die durch Permanentmagnete oder entsprechend erregte Spulen gebildet sein können. In Fig. 3 ist die Synchronmaschine ebenfalls veranschaulicht, indem die bei ihr vorhandenen Läuferpole (Bezugsziffer 39) schematisch angedeutet sind.

Der Luftspalt 40 zwischen Läufer 9 und Ständer 8 ist relativ groß; seine Weite beträgt 0,25 bis 2,5 mm, vorzugsweise 0,5 bis 1,5 mm.

Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen ist der Läufer außenliegend und der Ständer innenliegend.

Obwohl Fig. 3 eigentlich eine Drehfeldmaschine mit einem durchgehenden 360°-Drehfeld darstellt, kann sie auch der Veranschaulichung einer Sektormaschine mit mehreren unabhängigen Sektoren dienen. Bei unveränderten Ständerkörper sind bei der Sektormaschine vier Ständersektoren 41a bis 41d dadurch ausgebildet, daß sie jeweils eine eigene, in sich abgeschlossene Drei-Phasen-Ständerwicklung tragen, die elektrisch von den anderen unabhängig ist. Bei entsprechender Beschaltung mit vier unabhängigen Wechselrichtern erlaubt dies die Erzeugung von vier voneinander unabhängigen Wandfeldern, die auch Radialschwingungen verringern können. Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen ist nicht nur die einzelne Wicklung, sondern auch der Ständerkörper in seiner räumlichen Ausbildung auf einen oder mehrere Sektoren beschränkt. Diese Maschinen ähneln einem bzw. mehreren gekrümmten Linearomotoren.

Bei anderen (nicht dargestellten) Ausführungsformen ist der Läufer 9 zugleich als passiver Schwingungstilger ausgebildet, indem er aus einem zentralen Teil und einem dieses konzentrisch umgebenden äußeren Teil aufgebaut ist, die z. B. mittels einer dazwischen angeordneten Elastomerschicht elastisch miteinander gekoppelt sind.

Bei der Ausführungsform gemäß Fig. 4 ist in der elektrischen Maschine 4 die Kupplung 5 integriert. Innerhalb des z. B. am Motor- oder Getriebegehäuse drehfest

gelagerten Ständers 8 ist der Läufer 9 an seiner Peripherie einseitig über einen axial seitlich ausragenden Käfig 54 mit der Triebwelle 10 des Verbrennungsmotors 1 drehfest verbunden. Der Läufer 9 ist innen hohl und hat im wesentlichen die Form eines flachen Kreiszylinder-Mantels. In dem Hohlraum ist die Kupplung 5 — hier eine als Fahrkupplung fungierende Lamellenkupplung (Vielflächen-Reibscheibenkupplung) — angeordnet. Sie kann einen Kraftschluß zwischen der Triebwelle 10 mit dem Läufer 9 und einer in den Hohlraum ragenden Abtriebswelle 55 zum Getriebe 6 herstellen. Hierzu ist der Läufer 9 innenverzahnt und die Abtriebswelle 55 im Bereich des Hohlraums 55 außenverzahnt. In dem Raum dazwischen ist ein Scheibenpaket 56 angeordnet, dessen Scheiben 57 abwechselnd außen- und innenverzahnt sind, so daß abwechselnd jeweils eine Scheibe mit dem Läufer 9 (Außenlamelle 57a) und die nächste Scheibe mit der Abtriebswelle 55 (Innenlamelle 57b) formschlüssig verbunden ist. Ohne axialen Druck können die Außen- und Innenlamellen 57a, 57b praktisch frei gegeneinander rotieren, die Wellen 10, 55 sind dann entkuppelt. Preßt man die Außen- und Innenlamellen 57a, 57b mit Hilfe einer (nicht dargestellten) Druckvorrichtung (z. B. eines Winkelhebels) in Axialrichtung zusammen, stellen die entstehenden Reibkräfte den Kraftschluß zwischen den Wellen 10, 55 her, so daß sich das vom Verbrennungsmotor 1 und der elektrischen Maschine 4 erzeugte Drehmoment auf die Abtriebswelle 55 überträgt. Der Kraftschlußteil (d. h. hier das Scheibenpaket 56) der Kupplung 5 findet vollständig im Läufer 9 Platz, ragt also nicht etwa in Axialrichtung seitlich aus ihm heraus. Die Kupplung 5 ist als Naßkupplung ausgeführt. Das Kupplungsöl dient gleichzeitig der Kühlung der elektrischen Maschine 4. Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen sind andere schaltbare kraftschlüssige Kupplungen integriert, z. B. eine Einscheiben-Kupplung in Trocken- oder Naßbauweise.

Andere Nutzungen des Hohlraums im Inneren der elektrischen Maschine 4 sind möglich: Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen nimmt er beispielsweise die zweite, zum Schwungradspeicher 26 gehörige elektrische Maschine 27 samt Schwungrad 28 oder ein mechanisch einkoppelbares Schwungrad auf.

Fig. 5 zeigt einen schematischen Schaltplan des Wechselrichters 17. Man erkennt den Zwischenkreisspeicher 19 in Form einer Kapazität, welcher der (hier nicht näher dargestellte) Zusatzspeicher 24 parallelgeschaltet ist. Die Kapazität symbolisiert eine Parallelschaltung mehrerer Kondensatoren.

Der Maschinenwechselrichter 20 wird durch drei parallelgeschaltete (aber unabhängig schaltbare) Schaltergruppen 42 gebildet, wobei jede der Schaltergruppen 42 für die Erzeugung jeweils einer der drei Drei-Phasen-Spannungen zuständig ist. Jede der Schaltergruppen 42 ist eine Serienschaltung zweier (unabhängig schaltbarer) Schalter 43 zwischen dem Plus- und dem Minuspol des Zwischenkreises. Die Serienschaltung ist mittig (d. h. zwischen den Schaltern 43) mit einer Seite jeweils einer der drei Wicklungen 36a, 36b, 36c der Drei-Phasenwicklung 36 verbunden; an der anderen Seite sind die drei Wicklungen 36a, 36b, 36c miteinander verbunden.

Parallel zu den Schaltern 43 ist jeweils eine Freilaufdiode 44 geschaltet. Sie ist so gepolt, daß sie normalerweise sperrt und, nur wenn ein Schalter geöffnet wird, einen aufgrund von Selbstinduktion erzeugten, kurzzeitigen Stromfluß in Gegenrichtung durchläßt.

Jeder Schalter 43 symbolisiert eine Parallelschaltung von mehreren (z. B. fünf) MOS-Feldeffekttransistoren,

welche von der Steuereinrichtung 31 zur Bildung eines Drei-Phasen-Stroms gewünschter Amplitude, Frequenz und Phase direkt angesteuert werden.

Der Gleichspannungsumsetzer 18 umfaßt zwei Unter-Baugruppen, nämlich eine, welche elektrische Energie von dem niedrigen Spannungsniveau (12 V) auf das hohe Zwischenkreis-Spannungsniveau (350 V) bringen kann, und eine andere, welche — umgekehrt — elektrische Energie von dem hohen Spannungsniveau (350 V) auf das niedrige Spannungsniveau (12 V) bringen kann.

Bei der ersten Unter-Baugruppe handelt es z. B. sich um einen Hochsetzsteller 45. Dieser wird durch eine Serienschaltung einer mit dem Pluspol der Fahrzeugbatterie 11 verbundenen Induktivität 46 und einen mit deren Minuspol und dem Minuspol des Zwischenkreises verbundenen Schalter 47 gebildet, wobei diese Serienschaltung mittig über eine (in Durchlaßrichtung gepolte) Hochsetzdiode 48 mit dem Pluspol des Zwischenkreises verbunden ist. Bei geschlossenem Schalter 47 fließt ein Kreisstrom vom Plus- zum Minuspol der Fahrzeugbatterie 11. Nach Öffnen des Schalters 47 sucht eine Selbstinduktionsspannung ein Zusammenbrechen dieses Stromes zu verhindern, mit der Folge, daß kurzzeitig das hohe Zwischenkreis-Spannungsniveau (350 V) überschritten wird und Strom durch die (ansonsten sperrende) Hochsetzdiode 48 fließt und den Zwischenkreisspeicher 19 auflädt. Durch periodisches Öffnen und Schließen des Schalters 47 erzielt man einen quasi-stationären Ladestrom, z. B. als Vorbereitung des Startvorgangs. Bei dem Schalter 47 handelt es sich um einen Halbleiterschalter, welcher direkt von der Steuereinrichtung 31 angesteuert wird.

Die zweite Unter-Baugruppe ist z. B. ein Spannungsuntersetzer 49, der ähnlich einem Schaltnetzteil funktioniert. Er umfaßt zwei Serienschaltungen von Schaltern 50 zwischen dem Plus- und Minuspol des Zwischenkreises, mit jeweils parallelgeschalteten Freilaufdioden 51. Die Enden einer Primärwicklung eines Hochfrequenz(HF)-Transformators 52 sind jeweils mit den Mitten dieser Serienschaltungen verbunden. Die Sekundärwicklung des HF-Transformators 52 speist eine Gleichrichtungs- und Glättungseinheit 53, welche wiederum die Fahrzeugbatterie 11 und ggf. Niederspannungsverbraucher 23 speist. Die Schalter 50 symbolisieren Halbleiterschalter, welche direkt von der Steuereinrichtung 31 angesteuert werden. Durch periodisches Öffnen und Schließen der Schalter läßt sich ein hochfrequenter Wechselstrom erzeugen, welcher in der Sekundärwicklung des HF-Transformators 52 eine entsprechende Wechselspannung auf niedrigerem Spannungsniveau induziert, welche durch die Einheit 53 gleichgerichtet und geglättet wird. Der genaue Wert der resultierenden Gleichspannung läßt sich mit Hilfe der Schalter 50 durch Variation der Schaltfrequenz genau einstellen.

Das in Fig. 6 dargestellte Antriebssystem unterscheidet sich von den anhand der Fig. 1—5 dargestellten Ausführungsformen dadurch, daß hier — zusätzlich zu gemeinsamen Nutzung verschiedener Sensoren — auch die Steuerung des Verbrennungsmotors 1 und der elektrischen Maschine 4 durch eine gemeinsame Steuereinrichtung erfolgt.

Und zwar übernimmt hier die Steuereinrichtung 31 die Steueraufgaben des Verbrennungsmotor-Steuergeräts 33 von Fig. 2, welches deshalb hier entfallen kann. Die Steuereinrichtung 31 steuert einerseits — wie oben erläutert — die Wechselrichterschalter 43, 47, 50, derart, daß die elektrische Maschine 4 das gewünschte Drehmoment (Wechseldrehmoment, ggf. mit global überla-

gertem Drehmoment für Generatorfunktion, Bremsen, generatorisches Bremsen, Beschleunigen, sowie ggf. Drehmoment für Starterfunktion) erzeugt, und führt die Start-Stop-Steuerung durch. Andererseits steuert sie den Verbrennungsmotor wie ein Motormanagementsystem, d. h. sie steuert die Kraftstoffzufuhr, Drosselklappenstellung (insbesondere im Leerlauf), Kraftstoffeinspritzung (Zeitpunkt und Menge), Zündung (Zeitpunkt), Ventile (Öffnungs- und Schließzeitpunkte), Kühlung des Verbrennungsmotors 1 (insbesondere durch Steuerung der Kühlmitteltemperatur), Abgasrückführung (z. B. durch Steuerung eines Abgas-Rückführungsventils), und dadurch Drehzahl (insbesondere im Leerlauf), Drehmoment, Leistung, Kraftstoffverbrauch und Abgaszusammensetzung des Verbrennungsmotors 1.

Die Steuerung des Verbrennungsmotors 1 und der Start-Stop-Automatik erfolgt in Abhängigkeit von verschiedenen veränderlichen Größen: Zum einen in Abhängigkeit von benutzergesteuerten Größen, wie Fahrpedalstellung (und damit ggf. Drosselklappenstellung), vorgewählte Fahrgeschwindigkeit, gewählte Getriebe-Gangstufe, Brems- und Kupplungsbetätigung und Fahrcharakteristik in der Fahr-Vorgeschichte (z. B. sportliche Fahrcharakteristik); zum anderen Betriebsgrößen, wie Drehzahl, Kurbelwellenwinkel, Drehmoment, Gasdruck, Klopfen, Antriebschlupf, Kühlmitteltemperatur, Abgaszusammensetzung, Fahrgeschwindigkeit. All diese Steueraufgaben werden von der sehr leistungsfähigen Steuereinrichtung 31 zur Drehungleichförmigkeits-Verringerung mit übernommen.

Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen übernimmt ein — von einem herkömmlichen Motor-Managementssystem abgeleitetes — Motor-Steuergerät (ähnlich 33 in Fig. 2) die Steuerung der Drehungleichförmigkeits-Verringerung. Dort kann daher die Steuereinrichtung 31 entfallen.

Bei Ausführungsformen der in den Fig. 2 und 6 gezeigten Antriebssysteme ist der Verbrennungsmotor 1 ein leistungsstarker vielzylindriger Motor (z. B. mit sechs oder mehr Zylindern), bei dem zwecks Wirkungsgraderhöhung im Fall geringen abgefragten Drehmoments und bei niedrigen und mittleren Drehzahlen mehrere, insbesondere die Hälfte der Zylinder abgeschaltet werden, und zwar insbesondere durch Abschalten der Kraftstoffzufuhr zu den betreffenden Zylindern. Beispielsweise läuft dann ein Sechszylindermotor als Dreizylindermotor.

Die Steuerung der Zylinderabschaltung (und -anschaltung) übernimmt bei einer Ausführungsform entsprechend Fig. 2 das Motorsteuergerät 33, während bei einer Ausführungsform entsprechend Fig. 6 die gemeinsame Steuereinrichtung 31 auch hierfür zuständig ist. In beiden Fällen erzeugt das jeweilige Steuermittel 33 bzw. 31 — sobald die Bedingungen für eine Zylinderabschaltung vorliegen — ein Zylinderabschaltsignal, welches die Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr zu den betreffenden Zylindern herbeiführt. Sobald die Abschalt-Bedingungen nicht (mehr) vorliegen, wird das Abschalt-signal nicht (mehr) erzeugt — es werden dann (wieder) alle Zylinder mit Kraftstoff versorgt.

Das Abschaltsignal greift auch in die Steuerung der elektrischen Maschine (4) ein, wie anhand von Fig. 7 für den Fall einer (ggf. adaptiven) Kennfeldsteuerung oder einer Regelung mit (ggf. adaptiver) Kennfeld-Vorsteuerung veranschaulicht ist. Das dort gezeigte Steuerverfahren durchläuft in einer quasi-endlosen Schleife Schritte S1 bis S3.

Im Schritt S1 wird abgefragt, ob ein Zylinderab-

schaltsignal vorliegt. Falls nein, liest die Steuereinrichtung 31 im Schritt S2a die für den momentanen Betriebszustand (Drehzahl, Motorlast) erwarteten Drehungleichförmigkeits-Werte aus einem ersten Kennfeld, nämlich einem Kennfeld für Anschaltbetrieb (Sechszylinderbetrieb) aus. Falls ja, liest sie hingegen im Schritt S2b die entsprechenden — i. a. betragsmäßig größeren — Werte aus einem zweiten Kennfeld, nämlich einem Kennfeld für Abschaltbetrieb (Dreizylinderbetrieb) aus. In Abhängigkeit von dem ausgelesenen erwarteten Drehungleichförmigkeits-Wert wird im Schritt S3 das zum Unterdrücken dieser erwarteten Drehungleichförmigkeit benötigte Drehmoment ermittelt und die elektrische Maschine 4 entsprechend gesteuert (alternativ kann statt der erwarteten Drehungleichförmigkeit in den Kennfeldern auch bereits das zu deren Unterdrückung benötigte Drehmoment abgespeichert sein). Anschließend wird Schritt S1 wieder durchgeführt und das Steuerverfahren wird von neuem durchlaufen.

Bei einer (rückgekoppelten) Regelung mit Vorsteuerung handelt es sich bei dem im Schritt S2a bzw. S2b aus dem jeweiligen Kennfeld entnommenen Wert um einen Vorsteuerwert, der im Schritt S3 der Voreinstellung der Regelung dient. Die im Schritt S3 anschließend stattfindende (Nach)-Regelung ist in Fig. 7 nicht ausdrücklich dargestellt. Die Übergänge von "Abschaltsignal Aus" zu "Abschaltsignal An" und umgekehrt bewirken hier also eine Änderung der Voreinstellung der Regelung, die der jeweils beim Übergang erwarteten Änderung der Drehungleichförmigkeit entspricht.

Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen gibt es mehrere Stufen von Zylinderabschaltung. Beispielsweise können bei einem Achtzylindermotor in einem Übergangs-Abschaltsbereich zunächst nur zwei Zylinder, bei weiterem Fortschreiten in den Abschaltbereich hinein dann insgesamt vier Zylinder abgeschaltet werden. Das oben geschilderte Steuerverfahren läuft dann entsprechend mit zwei Abschaltsignalen und drei Kennfeldern ab.

Bei all diesen Ausführungsformen bemerkt der Benutzer praktisch nichts vom Zylinderabschaltsbetrieb und den Übergängen zwischen An- und Abschaltbetrieb und umgekehrt.

Fig. 8 veranschaulicht schematisch einen Steuerablauf einer Ausführungsform des Antriebssystems. Nach einem manuellen Start des Verbrennungsmotors 1 im Schritt T0 wird im folgenden Schritt T1 abgefragt, ob eine Bedingung zum Stoppen des Verbrennungsmotors 1 erfüllt ist. Im einzelnen setzt sich die Stopbedingung aus einer logischen UND-Verknüpfung folgender bestimmter Bedingungen zusammen:

1. Motordrehzahl  $n$  ist kleiner als 1300 U/min;
2. Kraftfahrzeug-Fahrgeschwindigkeit  $V$  ist kleiner als 4 km/h;
3. Kühlmitteltemperatur  $T$  des Verbrennungsmotors 1 ist größer als 60°C;
4. das Fahrzeug ist seit dem letzten (manuellen oder automatischen Start) wenigstens einmal schneller als 4 km/h gefahren; und
5. der Batterieladezustand ist für weitere Starterbetätigungen ausreichend (diese Bedingung ist in Fig. 8 nicht dargestellt).

Falls die Antwort auf diese Abfrage Nein ist, mündet der Steuerablauf wieder oben zwischen den Schritten T0 und T1 ein, so daß die Abfrage im Schritt T1 nach Art einer Quasi-Endlosschleife bis zum Eintreten der Stop-



bedingung wiederholt ausgeführt wird. Falls die Antwort hingegen Ja ist, wird der Verbrennungsmotor 1 im Schritt T2 automatisch gestoppt, z. B. durch Unterbrechen der Kraftstoffzufuhr.

Im anschließenden Schritt T3 wird abgefragt, ob eine Bedingung zum Starten des Verbrennungsmotors 1 (sog. Startbedingung) erfüllt ist. Die Startbedingung kann beispielsweise die Bedingung "Berührung des Gangschalthebels durch Benutzer?" sein. Falls die Antwort auf diese Abfrage Nein ist, mündet der Steuerablauf wieder oben zwischen den Schritten T2 und T3 ein, so daß die Abfrage im Schritt T3 nach Art einer Quasi-Endlosschleife wiederholt ausgeführt wird, solange bis die Startbedingung erfüllt ist. Falls die Antwort auf die Abfrage hingegen Ja ist, wird der Verbrennungsmotor 1 im Schritt T4 automatisch wieder gestartet, und zwar durch die direkt mit der Triebwelle 10 des Verbrennungsmotors 1 gekoppelte elektrische Maschine 4. Der Verbrennungsmotor 1 wird außerdem notgestartet, wenn seine Temperatur unter die Betriebstemperatur abnimmt oder der Ladezustand der Batterie aufgrund eingeschalteter Stromverbraucher unter einen bestimmten Grenzwert absinkt. Um hierbei ein unbeabsichtigtes Anfahren des Kraftfahrzeugs auszuschließen, wird jedoch das Erfülltsein der Bedingung "Kein Gang eingelegt" gefordert.

Anschließend mündet der Steuerablauf wieder oben zwischen den Schritten T0 und T1 ein, so daß der Steuerablauf wieder von vorne beginnt, also im folgenden wieder abgefragt wird, ob die Stopbedingung vorliegt. In beiden o.g. Quasi-Endlosschleifen ist außerdem noch eine (nicht gezeigte) Abfrage vorhanden, ob ein manueller Stop (etwa durch Drehen eines Zündschlüssels) durchzuführen ist. Falls in der jeweiligen Schleife die Antwort Nein ist, wird sie weiter durchlaufen. Falls die Antwort Ja ist, endet der Steuerablauf.

Eine elektrische Doppelmaschine 4 gemäß Fig. 9, welche zusätzlich die Funktion einer elektromagnetischen Kupplung und/oder Synchronisierereinrichtung ausführen kann, sitzt im Antriebsstrang 2 zwischen der Abtriebswelle, z. B. der Triebwelle 10 des Verbrennungsmotors 1, und der Abtriebswelle, z. B. der mit einem Getriebe 6 gekoppelten Getriebewelle 55. Sie umfaßt zwei elektrische Maschinen 4a, 4b mit jeweils einem drehfesten Ständer 8a, 8b und jeweils einem mit der An- bzw. Abtriebswelle drehenden Läufer 9a, 9b. Die Läufer 9a, 9b — und damit die An- und Abtriebswelle — sind mit Hilfe einer mechanischen Überbrückungs-Kupplung 60 — hier einer form- oder reibschlüssigen Kupplung — fest mechanisch miteinander verbindbar. Diese ist vorzugsweise in gesteuerter Weise betätigbar, z. B. mechanisch, elektrisch, hydraulisch oder pneumatisch. Bei anderen Ausführungsformen ist die Überbrückungs-Kupplung 60 nicht vorhanden.

Fig. 10 zeigt eine Fig. 9 entsprechende Doppelmaschine 4, bei der die Läufer 9a, 9b in koaxialer Anordnung in einem gemeinsamen Ständerkörper 59 angeordnet sind, der die beiden (elektrisch getrennten oder trennbaren) Ständer 8a, 8b aufnimmt und drehfest z. B. an einem Kurbelgehäuse 61 des Verbrennungsmotors 1 befestigt ist. Die (hier nicht dargestellte) Überbrückungskupplung kann z. B. dadurch realisiert sein, daß die Läufer 9a, 9b durch Axialverschiebung miteinander in Form- oder Reibschluß gebracht werden können. Alternativ kann sie durch z. B. durch eine in die Läufer 9a, 9b integrierte Reib- oder Klauenkupplung gebildet sein.

Die Doppelmaschine 4 der Fig. 9 und 10 hat neben ihrer Funktion als elektromagnetische Kupplung die

Funktionen einer aktiven Getriebe-Synchronisierereinrichtung, eines aktiven Drehungleichförmigkeits-Verringerers, eines Direkt-Starters für den Verbrennungsmotor, eines Generators zur Versorgung von Verbrauchern mit elektrischer Energie, und eines Boosters sowie einer generatorischen Bremse zur Unterstützung des Verbrennungsmotors 1 bzw. von Fahrzeugbremsen beim Beschleunigen bzw. Abbremsen etwa eines Kraftfahrzeugs, auch im Rahmen einer — durch Regelung des Schlupfes der elektrischen Maschine erzielbaren — ASR zur Antriebsradschlupf-Verringerung.

Bei der Kupplungsfunktion handelt es sich bei einer Ausführungsform um die Funktion einer Anfahr- und Schaltkupplung, bei einer anderen Ausführungsform nur um die einer Schaltkupplung zum Gangwechsel. Bei der ersten Ausführungsform kann die beim Kraftfahrzeug im Antriebsstrang vorhandene herkömmliche mechanische oder hydrodynamische Kupplung entfallen. Bei der zweiten Ausführungsform ist sie hingegen als Anfahrkupplung zusätzlich zur elektromagnetischen Kupplung 4 vorhanden. Sie ist z. B. nachfolgend in der Abtriebswelle 55 angeordnet und kann nach dem Anfahren — also auch während eines Gangwechsels — geschlossen bleiben.

Bei beiden Ausführungsformen wird die Überbrückungskupplung 60 bei Gleichlauf der Wellen 10, 55 geschlossen, um dann die elektromagnetischen Kupplungsverluste zu eliminieren, bei der zweiten Ausführungsform auch um das hohe Anfahrmoment zu übertragen, sowie bei anderen Funktionen, wie dem Drehungleichförmigkeits-Verringern und Starten, durch gekoppelten Parallellauf beider Maschinen 4a, 4b größere Drehmomente zur Verfügung zu haben. Da die Überbrückungskupplung 60 nur bei Wellengleichlauf eingekuppelt wird, ist sie vorteilhaft als formschlüssige Kupplung (z. B. Hakenkupplung) ausgebildet.

Bei einer dritten Ausführungsform hat die elektrische Doppelmaschine 4 keine Kupplungsfunktion, dient aber (wie bei der ersten und zweiten Ausführungsform) der aktiven Getriebesynchronisation durch Beschleunigen bzw. Abbremsen der Abtriebswelle 55 in dem Zeitraum zwischen Wellentrennung und -verbindung, die durch eine als mechanische oder hydrodynamische Anfahr- und Schaltkupplung, z. B. in Form einer reibschlüssig ausgebildeten Überbrückungskupplung 60 bewirkt wird.

Die elektrische Ansteuerung der Maschinen 4a, 4b erfolgt bei den Ausführungsformen mit Kupplungsfunktion unabhängig voneinander, hier durch zwei im wesentlichen unabhängige Wechselrichter, um die Erzeugung entgegengesetzter Drehmomente (z. B. wenn die antriebsseitige Maschine 4a als Generator und die abtriebsseitige 4b als Motor arbeitet) und/oder von Drehmomenten bei verschiedenen Drehzahlen (z. B. während des Anfahrens und nach Gangwechsel) zu ermöglichen. Bei der Ausführungsform ohne elektromagnetischen Kupplungsfunktion ist keine unabhängige Ansteuerung erforderlich. Hier genügt ein Wechselrichter, der zur Steuerung der verschiedenen Funktion (Synchronisierung, Drehungleichförmigkeits-Verringerung, Starten, Stromerzeugung, Beschleunigung, Bremsung) geeignet ist und wahlweise mit nur einer Maschine 4a oder 4b oder beiden Maschinen 4a, 4b koppelbar ist. Die wahlweise Koppelbarkeit erlaubt einerseits für manche Funktionen — etwa zum Starten — beide Maschinen 4a, 4b gemeinsam (bei geschlossener Überbrückungskupplung 60) Moment erzeugen zu lassen, und andererseits für andere Funktionen nur eine von ihnen (bei geöffnete-

ter Überbrückungskupplung 60) Moment erzeugen zu lassen — etwa die abtriebsseitige Maschine 4b ein bremsendes Moment zur Synchronisierung oder zum Abbremsen des Fahrzeugs erzeugen zu lassen. Elektrische Energie, die durch generatorisches Bremsen und Kupplungsschlupf anfällt, wird gespeichert, z. B. einem elektrischen (z. B. Kondensator), elektrochemischen (z. B. Batterie oder einem kinetomechanischen Speicher (z. B. Schwungrad-Speicher), und wiederverwendet. Falls die anfallende Energie oder Leistung das Aufnahmevermögen des Speichers übertrifft — was z. B. bei der Anfahrkupplungsfunktion der Fall sein kann, wird die Überschußenergie in Form von Wärme (über Heizwiderstände) abgeführt.

Eine elektrische Einzelmaschine 4 gemäß Fig. 12, welche die Funktion einer elektromagnetischen Kupplung und/oder Synchronisierereinrichtung hat, weist ein inneres und ein äußeres elektromagnetisches Wirkelement auf, die in Anlehnung an bei elektrischen Maschinen üblichen Bezeichnungen hier Läufer 9 und Ständer 8' genannt werden. Der Läufer 9 ist drehfest mit der Abtriebswelle 55 und der Ständer 8' ist drehfest mit der Triebwelle 10 verbunden (bei anderen — nicht gezeigten — Ausführungsformen ist diese Zuordnung umgekehrt). Die elektrische Maschine 4 ist also zusätzlich zur Läuferdrehung als Ganzes drehbar; der Begriff "Ständer" ist also angesichts dessen Drehbarkeit nur in einem übertragenen Sinn zu verstehen. Während es bei einer feststehenden elektrischen Maschine — z. B. einer Drehfeld-Maschine — möglich ist, die Stromzufuhr auf das feststehende Wirkelement (d. h. den Ständer) zu beschränken und im drehbaren Wirkelement (d. h. im Läufer) Ströme ohne Stromzufuhr nur durch Induktion hervorzurufen, wird hier — wo beide Wirkelemente drehbar sind — wenigstens einem von ihnen (hier dem Ständer 8') Strom über drehbewegliche elektrische Verbindungen (z. B. über hier nicht gezeigte Schleifer/Schleifring-Kontakte) zugeführt. Die Abtriebswelle 55 ist mit einer mechanischen Kupplung, hier einer gegen das Fahrzeugchassis oder das Getriebegehäuse abgestützten Bremse 62 gegen Drehung festlegbar. Die gezeigte Ausführungsform hat keine Überbrückungskupplung, andere (nicht gezeigte) Ausführungsformen sind jedoch mit einer reib- oder kraftschlüssigen Überbrückungskupplung zur mechanischen Verbindung der Wellen 10, 55 ausgerüstet. Die Maschine 4 kann im oder am Motorgehäuse, Getriebegehäuse oder an beliebiger anderer Stelle im Antriebsstrang 2 plaziert sein.

Die elektrische Einzelmaschine 4 kann — trotz ihres einfachen Aufbaus — im wesentlichen alle Funktionen der Doppelmaschine gemäß Fig. 9 und 10 ausführen, so daß die dort gemachten Ausführungen — soweit hier sinnvoll — auch hier Gültigkeit haben.

In der Funktion als Schaltkupplung und ggf. als Anfahrkupplung wird ein Gleichlauf der Wellen 10, 55 durch eine solche Einstellung der drehmomenterzeugenden magnetischen Felder der Maschine 4 erzielt, daß Drehzahlgleichheit zwischen den Wellen 10, 55 herrscht, also der Kupplungsschlupf zwischen Ständer 8' und Läufer 9 genau verschwindet. Bei einer Asynchronmaschine wird dies beispielsweise durch die Regelung bzw. Steuerung des magnetischen Schlupfes eines entgegen der Antriebsdrehmoment-Richtung umlaufenden Drehfelds geeigneter Frequenz und Amplitude erzielt. Eine (hier nicht dargestellte) formschlüssige Überbrückungskupplung eliminiert bei verschwindendem Kupplungsschlupf die elektromagnetischen Verluste.

Die aktive Getriebesynchronisierung — die bei Aus-

führungsformen der Einzelmaschine 4 auch ohne Kupplungsfunktion realisiert sein kann — erfolgt hier in Abstützung gegen die mit der variablen Drehzahl des Verbrennungsmotors 1 drehende Triebwelle 10. Der Beitrag dieser Drehung wird bei der Bestimmung und Steuerung der für die jeweilige Synchronisation nötigen Relativdrehzahl der Maschine 4 berücksichtigt.

Eine Verringerung von Drehungleichförmigkeiten der Triebwelle 10 kann im Stand des Fahrzeugs in Abstützung gegen den dann mit Hilfe der Bremse 62 gegen Drehung festgelegten Läufer 9 erfolgen. Bei angetriebener Fahrt können bei nicht eingekuppelter (oder nicht vorhandener) Überbrückungskupplung Drehungleichförmigkeiten der Abtriebswelle 55 durch schnelles Variieren des übertragenen Drehmoments verringert werden, und zwar durch dessen Verkleinerung (d. h. einer Vergrößerung des Kupplungsschlupfes) bei positiver Drehungleichförmigkeit und dessen Vergrößerung (d. h. einer Verkleinerung des Kupplungsschlupfes) bei negativer.

Zusatzbeschleunigung oder -bremsung ist bei nicht eingekuppelter Überbrückungskupplung durch Erzeugung entsprechenden Drehmomente — oder anders ausgedrückt — kleineren oder größeren Kupplungsschlupfes möglich. Die elektrische Maschine 4 kann in eine ASR-Regelung derart einbezogen sein, daß bei zu großem Antriebsrad-Schlupf der Kupplungsschlupf augenblicklich vergrößert und damit das an den Antriebsrädern anliegende Moment verkleinert wird. Eine Generatorfunktion zur Stromerzeugung wird durch dauernd aufrechterhaltenen Kupplungsschlupf erzielt.

Die elektrische Maschine 4 kann den Verbrennungsmotors 1 direkt in Abstützung gegen die durch die Bremse 62 festgelegte Abtriebswelle 55 starten. Bei einer anderen Ausführungsform, bei der die Maschine 4 hierfür kein ausreichendes Drehmoment aufbringt, kann sie unter Ausnutzung der elektromagnetischen Kupplungsfunktion als verschleißfreier Schwungradstarter dienen. Hierzu beschleunigt die elektrische Maschine 4 zunächst bei nicht eingelegtem Gang und gelöster Bremse 62 den dann freilaufenden Läufer 9 zusammen mit der Abtriebswelle 55 in Abstützung gegen die Triebwelle 10 und die Kompression des noch nicht laufenden Verbrennungsmotors 1 auf eine relativ hohe Drehzahl, z. B. auf 2000 U/min. Dann wird die elektrische Maschine 4 innerhalb kurzer Zeit so umgesteuert, daß sie ein bremsendes Moment, also Kraftschluß zwischen dem Läufer 9 und dem Ständer 8' herstellt. Dadurch werden der Läufer 9 mit der Abtriebswelle 55 und der Ständer 8' mit der Triebwelle 10 schnell auf eine gemeinsame mittlere Drehzahl (z. B. 800 U/min) gebracht und der Verbrennungsmotor 1 gestartet.

Fig. 13 zeigt eine Weiterbildung der elektrischen Maschine mit drehbaren Wirkeinheiten gemäß Fig. 12. Die dort sowie im Zusammenhang mit Fig. 9 und 10 gemachten Ausführungen haben auch hier — soweit sinnvoll — Gültigkeit. Die Maschine 4 gemäß Fig. 13 hat bei etwas größerem Aufwand den Vorteil, auch im Antriebszustand des Antriebssystems eine Verringerung von Drehungleichförmigkeiten an ihrem Ursprung — also an der Triebwelle 10, und nicht nur an der Abtriebswelle 55 — zu erlauben, ferner die Generatorfunktion bei geschlossener Überbrückungskupplung — und damit bei höherem Wirkungsgrad — bereitzustellen, sowie die Synchronisierung bezüglich eines feststehenden — und nicht mit variabler Drehzahl rotierenden — Bezugselements zu ermöglichen, was deren Steuerung vereinfacht.



Dies wird dadurch erreicht, daß der Ständer 8' nicht mehr dauernd mit der Triebwelle 10 gekoppelt ist, sondern in steuerbarer Weise drei verschiedene Kopp-  
lungszustände einnehmen kann:

1. mit der Triebwelle 10 gekoppelt (wie in Fig. 12);
2. ohne Kupplung mit der Triebwelle 10 frei dreh-  
bar;
3. gegen Drehung festgelegt.

Zwei zusätzliche mechanische Kupplungen, bei denen es sich um reibschlüssige, vorzugsweise aber um form-  
schlüssige Kupplungen handeln kann, dienen hierzu: Eine Motorkupplung 63, die im geschlossenen Zustand den Ständer 8' mit der Triebwelle 10 koppelt (Kopp-  
lungszustand 1), und eine Festleg-Kupplung 64, die ihn im geschlossenen Zustand gegen Drehung festlegt, z. B. durch Kupplung mit dem Kurbelgehäuse 61 (Kopp-  
lungszustand 3). Für den Koppungszustand 2 sind beide geöffnet; ein gleichzeitiges Schließen ist ein verbotener Zustand. Die Kupplungen 63, 64 (die in Fig. 13 nur aus  
Gründen der Rotationssymmetrie doppelt gezeichnet sind), sowie die Überbrückungskupplung 60 sind in ge-  
steuerter Weise betätigbar, z. B. mechanisch, elektrisch, hydraulisch oder pneumatisch.

Die Steuerung der elektrischen Maschine 4 und der Kupplungen 60, 62, 63 erfolgt durch die verschiedenen Betriebszustände und Funktionen des Antriebssystems gemäß folgenden Verfahrensabläufen:

1. Starten des Verbrennungsmotors 1 (Schwun-  
grad-Start):
- i. Gang freischalten (z. B. durch Bedienungsperson);
- ii. Motorkupplung 63 wird geschlossen;
- iii. Läufer 9 wird durch elektrische Maschine 4 auf  
hohe Drehzahl beschleunigt;
- iv. Bremsmoment in elektrischer Maschine 4 wird  
eingeschaltet, dadurch wird Läufer 9 abgebremst  
und Ständer 8' beschleunigt, so daß der Verbren-  
nungsmotor 1 startet;
2. Anfahren des Fahrzeugs:
- i. Überbrückungskupplung 60 wird geöffnet;
- ii. Läufer 9 wird durch elektrische Maschine 4 zum  
Stillstand gebracht;
- iii. 1. Gang wird eingelegt (z. B. durch Bedienung-  
person);
- iv. Läufer 9 wird elektromagnetisch mit Anfahr-  
Nennmoment beschleunigt, d. h. durch Ständer 8'  
mitgenommen;
- v. bei Gleichlauf wird Überbrückungskupplung 60  
geschlossen;
3. Stationärer Fahrbetrieb mit Drehungleichför-  
migkeits-Verringerung:
- i. Motorkupplung 63 wird geöffnet, so daß der Stän-  
der 8' frei dreht;
- ii. Ständer 8' wird durch elektrische Maschine 4  
zum Stillstand gebracht;
- iii. Festleg-Kupplung 64 wird geschlossen, so daß  
eine starre Verbindung zwischen Ständer 8' und  
dem Kurbelgehäuse des Verbrennungsmotors 1  
herrscht;
- iv. Wechsellmoment zur Verringerung von Dre-  
hungleich förmigkeiten der Triebwelle 10 wird von  
der elektrischen Maschine 4 erzeugt;
4. Schalten:
- i. Verbrennungsmotor-Antriebsmoment wird weg-  
genommen (ggf. mit Unterstützung der elektri-  
schen Maschine (z. B. durch Bedienungsperson));

- ii. Überbrückungskupplung 60 wird geöffnet;
- iii. Gang wird herausgenommen (z. B. durch Bedie-  
nungsperson);
- iv. Läufer 9 wird auf diejenige neue Drehzahl be-  
schleunigt oder abgebremst, welche die Synchroni-  
sierungsbedingung für den neu einzulegenden Gang er-  
füllt;
- v. dieser Gang wird eingelegt (z. B. durch Bedie-  
nungsperson);
- vi. Überbrückungskupplung 60 wird geschlossen;
- vii. Verbrennungsmotor-Antriebsmoment wird  
wieder freigegeben (z. B. durch Bedienungsperson).

Eine Drehungleichförmigkeits-Verringerung ist auch im Leerlauf möglich, wie folgende Verfahrensabfolge zeigt, die sich an den obigen Schritt 1 anschließen kann:

5. Leerlauf mit Drehungleichförmigkeits-Verringe-  
rung:
- i. Motorkupplung 63 wird geöffnet, so daß der Stän-  
der 8' frei dreht;
- ii. Ständer 8' wird durch elektrische Maschine 4  
zum Stillstand gebracht;
- iii. Festleg-Kupplung 64 wird geschlossen, so daß  
eine starre Verbindung zwischen Ständer 8' und  
dem Kurbelgehäuse des Verbrennungsmotors 1  
herrscht;
- iv. Wechsellmoment zur Verringerung von Dre-  
hungleich förmigkeiten der Triebwelle 10 wird von  
der elektrischen Maschine 4 erzeugt.

Das Schließen der Kupplungen 60, 63, 64 erfolgt nur bei jeweils verschwindender Relativedrehzahl. Die Ge-  
neratorfunktion und bremsende oder antreibende Zu-  
satz-Drehmomente werden — wie die Synchronisie-  
rungsfunktion und die Drehungleichförmigkeits-Verrin-  
gerung — bei geschlossener Überbrückungskupplung  
60 und geschlossener Festleg-Kupplung 64 durch ent-  
sprechende bremsende bzw. antreibende Momente der  
elektrischen Maschine 4 verwirklicht.

Andere Ausführungsformen starten den Verbren-  
nungsmotor 1 direkt, und zwar bei geschlossener Über-  
brückungskupplung 60 und geschlossener Festleg-  
Kupplung 64.

Die elektrische Maschine 4 gemäß Fig. 14 entspricht funktionell weitgehend der in Fig. 13 gezeigten, so daß die Ausführungen zu Fig. 13 sowie Fig. 9 bis 12 auch hier — soweit sie nicht im folgenden genannte Abwei-  
chungen betreffen — Geltung haben. Ein wesentlicher Unterschied zur Maschine gemäß Fig. 13 besteht darin, daß die Umschaltung von "drehbarem Läufer" auf "fest-  
stehenden Läufer" nicht mechanisch durch Öffnen und Schließen von Kupplungen, sondern auf elektrischem Wege erfolgt. Ein weiterer Unterschied besteht darin, daß bei der gezeigten Maschine 4 die Rollen der Trieb-  
welle 10 und der Abtriebswelle 55 gegenüber Fig. 13 vertauscht sind, was zu geringfügigen — unten näher erläuterten — Abweichungen in der Funktionsweise führt. Bei (nicht gezeigten) Ausführungsformen entsprechen die Rollen der Triebwelle 10 und der Abtriebswelle 55 jedoch denen von Fig. 13; diese Ausführungsformen zeigen nicht diese Abweichungen.

Bei der gezeigten elektrischen Maschine 4 sind — wie gesagt — der (außenliegende) Ständer 8' und der (innen-  
liegende) Läufer 9 drehfest und nicht entkoppelbar, mit der Abtriebswelle 55 bzw. der Triebwelle 10 verbunden. Zusätzlich zum drehbaren Ständer 8' ist die Maschine 4 mit einem gegen Drehung festliegenden Ständer 8 aus-

gerüstet, der sich (z. B.) gegen das Kurbelgehäuse 61 abstützt. Dieser ist dem drehbaren Ständer 8' unmittelbar benachbart, und zwar in Axialrichtung (z. B.) zum Verbrennungsmotor 1 hin versetzt. Er ist coaxial zum drehbaren Ständer 8' angeordnet und weist einen Innendurchmesser wie jener auf. Die Wicklungen 36 der beiden Ständer 8', 8 sind eigenständig, so daß sie in ihrer Magnetfelderzeugung entkoppelt oder entkoppelbar sind. Der Läufer 9 ist so breit ausgebildet, daß er sich in Axialrichtung im wesentlichen über die Wirkflächen der beiden Ständer 8', 8 erstreckt. Eine Überbrückungskupplung 60 koppelt — wie in Fig. 13 — die Triebwelle 10 mit der Abtriebswelle 50. Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen sind der Läufer 9 außen- und die Ständer 8', 8 innenliegend.

Das Umschalten zwischen dem festliegenden Ständer 8 und dem drehbaren Ständer 8' erfolgt mit Hilfe einer umschaltbaren Versorgungseinheit, hier des geeignet umschaltbaren Wechselrichters 17. Dieser versorgt entweder für die Funktionen Direktstart, Drehungleichförmigkeits-Verringerung, Fahrzeugbremsung und beschleunigung sowie die Generatorfunktion den festgelegten Ständer 8 oder für die Funktionen elektromagnetische Kupplung, Synchronisierung sowie Schwungrad-Start den drehbaren Ständer 8' mit den hierfür jeweils erforderlichen Strömen und Spannungen, wobei er zwischen diesen trägeitslos und ohne merkliche Zeitverzögerung umschalten kann.

Anders als in Fig. 13 wird die Funktion "Synchronisierung" durch Momenterzeugung zwischen dem drehbaren Ständer 8' und dem Läufer 9 gesteuert, was steuerungstechnisch wegen der Abstützung gegen die drehzahlvariable Triebwelle 10 aufwendiger ist. Dies liegt daran, daß bei der Maschine 4 gemäß Fig. 14 die Überbrückungskupplung 60 in Abtriebsrichtung gesehen hinter der durch den festliegenden Ständer 8 und den Läufer 9 gebildeten elektrischen Maschine liegt, während sie bei der Maschine 4 gemäß Fig. 13 bei festliegendem Ständer vor der elektrischen Maschine 4 liegt. Bei der (nicht gezeigten) Ausführungsform, bei der die Rollen der Triebwelle 10 und der Abtriebswelle 55 gegenüber Fig. 14 vertauscht sind, ist dieser funktionelle Unterschied zu Fig. 13 nicht vorhanden.

Bei anderen Ausführungsformen werden die beiden Ständer 8, 8' simultan und unabhängig mit Hilfe zweier unabhängiger Versorgungseinrichtungen, hier Wechselrichter 17 gespeist.

Dies ermöglicht eine Ausführung von dem festliegenden Ständer 8 zugeordneten Funktionen, z. B. der Generatorfunktion und der Drehungleichförmigkeits-Verringerung auch während der Ausführung von dem drehbaren Ständer 8' zugeordneten Funktionen, z. B. der elektromagnetischen Kupplungsfunktion.

Eine weitere (nicht gezeigte) Ausführungsform der elektrischen Maschine mit einem Läufer, einem permanent festliegenden Ständer und einer mechanischen Kupplung zwischen dem Antriebsaggregat und der elektrischen Maschine erlaubt eine aktive Getriebesynchronisierung, stellt jedoch keine elektromagnetische Kupplungsfunktion bereit.

Fig. 14 zeigt eine Ausführungsform des Systems entsprechend Fig. 2 mit der elektrischen Maschine von Fig. 13 mit elektrisch umschaltbarem Doppelständer. Im wesentlichen sind in der folgenden Beschreibung nur Unterschiede und Ergänzungen zu dem System gemäß Fig. 2 erwähnt.

Die elektrische Maschine 4 umfaßt zwei äußere Ständer 8, 8' und einen inneren bürstenlosen Läufer 9, der

sich in Axialrichtung über die Wirkfläche beider Ständer 8, 8' erstreckt. Der erste, antriebsseitige Ständer 8 stützt sich drehfest z. B. gegen den Verbrennungsmotor 1 ab, wohingegen der zweite, antriebsseitige Ständer 8' drehfest mit der Abtriebswelle 55 verbunden ist. Der Läufer 9 sitzt direkt auf der Triebwelle 10 oder einer Verlängerung hiervon und ist mit dieser drehfest gekoppelt. Die Triebwelle 10 und der Läufer 9 sowie die Abtriebswelle und der drehbare Ständer 8' rotieren also jeweils gemeinsam. Die Triebwelle 10 und die Abtriebswelle 55, die zwischen dem Läufer 9 und dem drehbaren Ständer 8' getrennt sind, sind mit einer im Inneren des Läufers 9 integrierten formschlüssigen Überbrückungskupplung 60, hier einer steuerbar betätigbaren Klauenkupplung koppelbar.

Die elektrische Maschine 4 fungiert hier außerdem als elektromagnetische Anfahr- und Schaltkupplung und als aktive Getriebe-Synchronisierereinrichtung, wie im Zusammenhang mit den Fig. 9 — 13 bereits erläutert wurde, und ersetzt damit auch die (hier nicht vorhandene) mechanische Fahrkupplung 5 und erlaubt die Verwendung eines unsynchronisierten Getriebes.

Der Wechselrichter 17 liefert hier in umschaltbarer Weise entweder dem festliegenden Ständer 8 oder dem drehbaren Ständer 8' oder beiden parallel elektrische Energie. Die Zuführung zum drehbaren Ständer 8' erfolgt über (nicht gezeigte) Drehkontakte, hier Schleifer/Schleifring-Kontakte. Der externe Zusatzspeicher 24 dient hier auch der Speicherung derjenigen Energie, die beim Anfahren (d. h. Schlupfenergie) und beim abbremenden Synchronisieren anfällt. Diese Energie kann z. B. für entsprechende Funktionen mit Energiebedarf wiederverwendet werden. Die Steuereinrichtung 31 bestimmt auch, welcher Ständer 8, 8' angesteuert wird und gibt dem Wechselrichter 17 auch bezüglich der Kupplungs- und Synchronisierungsfunktion durch entsprechende Ansteuerung seiner Halbleiterschalter zu jedem Zeitpunkt vor, welche Amplitude, Frequenz und Phase die von ihm zu erzeugende Wechselspannung haben soll. Sie kann dies z. B. mit Hilfe gespeicherter Kennfeldwerte tun, die für die verschiedensten Betriebszustände für Kupplungsvorgänge das Soll-Drehmoment (oder den Soll-Kupplungsschlupf) sowie für Getriebesynchronisierungs-Vorgänge die Soll-Drehzahl, jeweils als Funktionen der Zeit, repräsentieren. Gegebenenfalls kann die Drehmomentbestimmung ergänzt sein durch eine laufende Messung dieser Größen und eine rückgekoppelte Regelung, welche die Einhaltung der Vorgabe sicherstellt. Die Steuereinrichtung 31 teilt zur Erfüllung ihrer Steueraufgaben hier auch Sensoren zur Erfassung der Drehzahl des Achsantriebs 7 und der eingelegten Gangstufe mit dem Motorsteuergerät 33. Das ASR-Steuergerät 34 gibt hier der Steuereinrichtung 31 bei Vorliegen von Antriebsschlupf vor, daß die elektrische Maschine 4 — neben der Möglichkeit, als generatorische Bremse zu wirken — bei geöffneter Überbrückungskupplung 60 vorübergehend den Kupplungsschlupf vergrößern soll.

Bei einer weiteren (nicht gezeigten) Ausführungsform entsprechend Fig. 6 übernimmt die Steuereinrichtung 31 die Steueraufgaben des Verbrennungsmotor-Steuergeräts 33 von Fig. 14, welches deshalb bei dieser Ausführungsform entfallen kann.

#### Patentansprüche

1. System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten einer Welle, insbesondere der

Triebwelle (10) eines Verbrennungsmotors (1), mit  
— wenigstens einer elektrischen Maschine (4),  
insbesondere Dreh- oder Wanderfeldmaschine,  
die mit der Welle gekoppelt oder koppel-

bar ist;  
— wenigstens einem Wechselrichter (17) zum  
Erzeugen der für die magnetischen Felder der  
Maschine (4) benötigten Spannungen und/  
oder Ströme variabler Frequenz, Amplitude

und/oder Phase;  
— wenigstens einer Steuereinrichtung (31), die  
den Wechselrichter (17) und damit die elektri-  
sche Maschine (4) so steuert, daß diese positi-  
ven und negativen Drehungleichförmigkeiten

der Welle entgegenwirkt.

2. System nach Anspruch 1, bei welchem das Entge-  
genwirken so erfolgt, daß die elektrische Maschine  
(4) ein schnell alternierendes, und zwar bei einer  
positiven Drehungleichförmigkeit ein bremsendes  
und bei einer negativen Drehungleichförmigkeit  
ein antreibendes Drehmoment erzeugt, dem sie zur  
zusätzlichen Erzielung einer antreibenden Wirkung  
oder einer bremsenden oder generatorischen Wir-  
kung insbesondere ein positives bzw. negatives  
Drehmoment überlagern kann.

3. System nach Anspruch 1 oder 2, bei welchem  
beim Verringern einer positiven Drehungleichfö-  
rmigkeit gewonnene Energie (Drehungleichförmig-  
keits-Bremsenergie) sowie ggf. bei bremsendem  
Zusatz-Drehmoment gewonnene Energie (Zusatz-  
drehmoment-Bremsenergie) wenigstens teilweise  
gespeichert wird und die gespeicherte Drehung-  
leichförmigkeits-Bremsenergie wenigstens teilwei-  
se zum Verringern einer negativen Drehungleich-  
förmigkeit wiederverwendet wird.

4. System nach Anspruch 3, bei welchem der Wech-  
selrichter (17) ein Zwischenkreis-Wechselrichter  
ist, dessen Zwischenkreis wenigstens einen elektri-  
schen Bremsenergie-Speicher (19, 24) aufweist oder  
mit wenigstens einem solchen gekoppelt ist.

5. System nach Anspruch 3 oder 4, bei welchem ein  
Schwungrad (28) zur Speicherung der Bremsener-  
gie dient, wobei das Schwungrad (28) insbesondere  
über eine elektrische Maschine (27) mit dem Sys-  
tem gekoppelt ist.

6. System nach einem der vorhergehenden Ansprü-  
che, bei welchem die elektrische Maschine (4) au-  
ßerdem die Funktion eines Starters hat.

7. System nach einem der vorhergehenden Ansprü-  
che, bei welchem die elektrische Maschine (4) au-  
ßerdem die Funktion eines Generators zur Strom-  
versorgung hat.

8. System nach einem der vorhergehenden Ansprü-  
che, bei welchem die elektrische Maschine (4) ein  
Beschleunigen und/oder Abbremsen der Welle her-  
beiführen oder unterstützen kann, insbesondere um  
ein Fahrzeug zu beschleunigen bzw. abzubrem-  
sen und/oder um im Rahmen einer Anti-Schlupf-Rege-  
lung durch Bremsen den Schlupf eines Antriebsra-  
des zu verringern.

9. System nach einem der vorhergehenden Ansprü-  
che, bei welchem die elektrische Maschine (4)  
Strom auf relativ hohem Spannungsniveau, insbe-  
sondere höher als 100 V liefert, und Hilfsmaschinen,  
wie Klimamaschinen (29), Servoantriebe (30), Pum-  
pen, elektrisch auf dem hohen Spannungsniveau  
angetrieben werden.

10. System nach einem der vorhergehenden An-

sprüche, bei welchem das Verringern von Drehung-  
leichförmigkeiten durch Regelung, Steuerung, und  
zwar insbesondere Kennfeldsteuerung, adaptive  
Steuerung, und/oder Mischformen hiervon erfolgt.

11. System nach Anspruch 10, bei welchem der  
Gasdruck und/oder das momentane Drehmoment  
des Verbrennungsmotors (1) als Regelgröße zum  
Verringern von Drehungleichförmigkeiten dient.

12. System nach einem der vorhergehenden An-  
sprüche, bei welchem die elektrische Maschine (4)  
einen Feldsektor (41) oder mehrere Feldsektoren  
(41) mit wenigstens teilweise unabhängigen Wan-  
derfeldern aufweist, wobei das bzw. die Wan-  
derfeld(er) in dem (den) Feldsektor(en) (41) so gesteu-  
ert ist (sind), daß die elektrische Maschine (4) neben  
Drehungleichförmigkeiten auch Radialschwingun-  
gen der Welle verringert.

13. System nach einem der Ansprüche 1—11, wel-  
ches außerdem wenigstens einen Aktuator auf-  
weist, der Radialkräfte auf die Welle ausüben kann  
und so gesteuert ist, daß er Radialschwingungen  
der Welle entgegenwirkt.

14. System nach einem der vorhergehenden An-  
sprüche, bei welchem die elektrische Drehfeldma-  
schine bzw. Wanderfeldmaschine (Linearmaschine)  
eine Asynchronmaschine, eine Synchronmaschine  
oder eine Reluktanzmaschine ist.

15. System nach einem der vorhergehenden An-  
sprüche, bei welchem die Steuerung der elektri-  
schen Maschine (4) auf der Grundlage einer feld-  
orientierten Regelung (Vektorregelung) erfolgt.

16. System nach einem der vorhergehenden An-  
sprüche, bei welchem die elektrische Maschine (4)  
eine feine Polteilung, insbesondere wenigstens ein-  
nen Pol (39) pro 45°-Ständerwinkel, aufweist.

17. System nach einem der vorhergehenden An-  
sprüche, bei welchem die elektrische Maschine (4)  
eine hohe maximale Polwechselfrequenz, insbeson-  
dere zwischen 300 und 1600 Hz und mehr, hat.

18. System nach einem der vorhergehenden An-  
sprüche, bei welchem der Ständer (8) der elektri-  
schen Maschine (4) dünne Ständerbleche, insbeson-  
dere mit einer Dicke von 0,35 mm oder weniger,  
aufweist und/oder die Ständerbleche aus einem  
Material mit niedrigen Ummagnetisierungsverlu-  
sten, insbesondere kleiner als 1 Watt/Kilogramm  
bei 50 Hz und einem Tesla, gefertigt sind.

19. System nach einem der vorhergehenden An-  
sprüche, bei welchem die elektrische Maschine (4)  
eine innere Fluidkühlung, insbesondere eine Sprüh-  
fluidkühlung (12), aufweist, wobei die Zufuhr des  
Kühlfluids insbesondere verlustleistungs- und/oder  
drehzahlabhängig erfolgt.

20. System nach einem der vorhergehenden An-  
sprüche, bei welchem die elektrische Maschine (4)  
eine hohe Drehmomentdichte — bezogen auf das  
maximale Drehmoment — aufweist, insbesondere  
größer als 0,01 Nm/cm<sup>3</sup>.

21. System nach einem der vorhergehenden An-  
sprüche, bei welchem die elektrische Maschine (4)  
stark im Bereich magnetischer Sättigung arbeitet,  
insbesondere bei einem Strombelag (bei max.  
Drehmoment) von wenigstens 400 bis 1000 A/cm  
Luftspaltlänge in Umfangsrichtung.

22. System nach einem der vorhergehenden An-  
sprüche, bei welchem der Wechselrichter (17) zu-  
mindest zeitweise mit einer hohen Taktfrequenz,  
insbesondere 10 kHz bis 100 kHz und höher, arbei-

tet.

23. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem elektronische Schalter (43, 47, 50) des Wechselrichters (17) fluidgekühlt, insbesondere siedebadgekühlt, sind.

24. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem mehrere elektronische Schalter (43) des Wechselrichters (17), insbesondere 2 bis 20 und mehr, parallel geschaltet sind.

25. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem der Wechselrichter (17) als Schalter (43, 47, 50) Halbleiterschalter, insbesondere schnelle Halbleiterschalter, wie Feldeffekttransistoren, bipolare Transistoren und/oder bipolare Transistoren mit isoliertem Gateanschluß (IGBTs) umfaßt.

26. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem der Wechselrichter (17) die für die magnetischen Felder der elektrischen Maschine (4) benötigten Spannungen und/oder Ströme variabler Frequenz, Amplitude und/oder Phase durch Pulse, insbesondere auf der Grundlage von Pulsweiten- oder Pulsamplitudenmodulation, erzeugt.

27. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem in die elektrische Maschine (4), und zwar insbesondere in deren Läufer (9), eine Kupplung, insbesondere eine Fahrkupplung (5) integriert ist.

28. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem die elektrische Maschine (17) oder die Welle mit einem Läuferlage- bzw. Wellenlage-Geber, insbesondere einem Drehtransformator (16) oder einem Kodierer, ausgerüstet ist.

29. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit einem Antriebsaggregat, insbesondere dem Verbrennungsmotor (1), wobei wenigstens ein Sensor (16, 32) und/oder wenigstens eine aus Sensorinformation abgeleitete Größe sowohl der Steuerung des Antriebsaggregats als auch der Steuerung der elektrischen Maschine (4) dient, und/oder wobei eine für die Steuerung der elektrischen Maschine (4) oder des Antriebsaggregats zuständige Steuereinrichtung (31 bzw. 33) auch das Antriebsaggregat bzw. die elektrische Maschine (4) teilweise oder ganz steuert.

30. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem der Verbrennungsmotor (1) mehrzylindrig ist und welches eine Einrichtung (31 bzw. 33) zur Abschaltung wenigstens eines Teils der Zylinder des Verbrennungsmotors (1) umfaßt; wobei das System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten wenigstens während Zylinderabschaltbetrieb zumindest bei bestimmten Betriebszuständen aktiv ist.

31. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem die elektrische Maschine (4) direkt mit der Triebwelle (10) des Verbrennungsmotors (1) gekoppelt ist und so ausgebildet ist, daß sie den Verbrennungsmotor (1) im Zusammenlauf aus dem Stand starten kann, und das System Teil eines Antriebssystems mit einer automatischen Start-Stop-Steuerung des Verbrennungsmotors (1) ist.

32. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem die elektrische Maschine (4) als elektromagnetische Kupplung im Antriebsstrang (2) und/oder als aktive Getriebe-Synchroni-

sierereinrichtung oder als ein Teil hiervon wirkt.

33. System, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit einer Antriebsschlupfregelung, bei welchem die (bzw. eine) elektrische Maschine (4) derart ausgelegt ist, daß mit ihr eine Antriebsschlupfverringerng durch Verkleinerung des Antriebsmoments herbeiführbar ist, insbesondere durch Bremswirkung und/oder — bei als Kupplung wirkender elektrischer Maschine — durch Kupplungsschlupf-Wirkung.

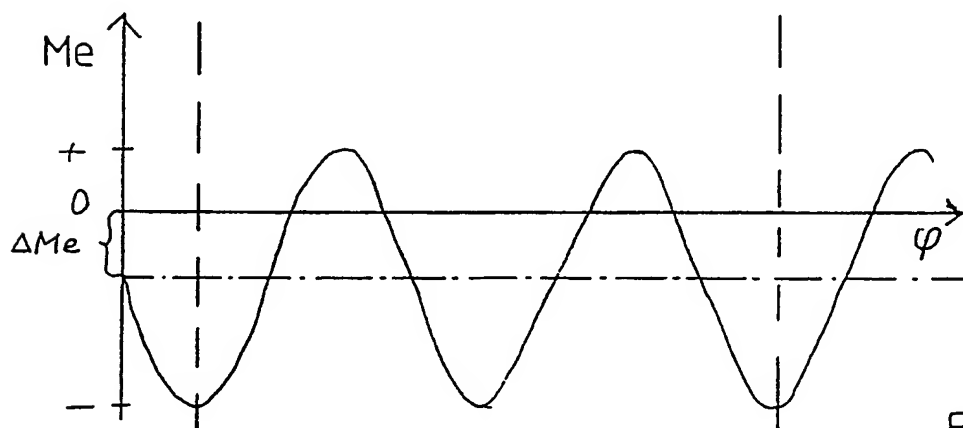
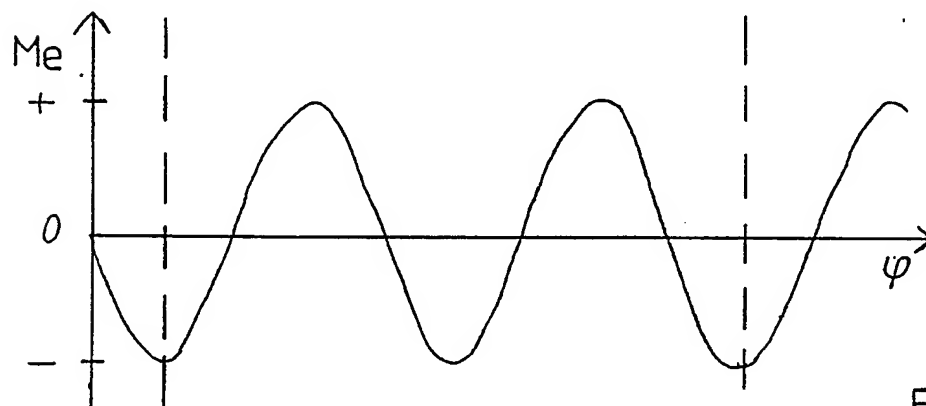
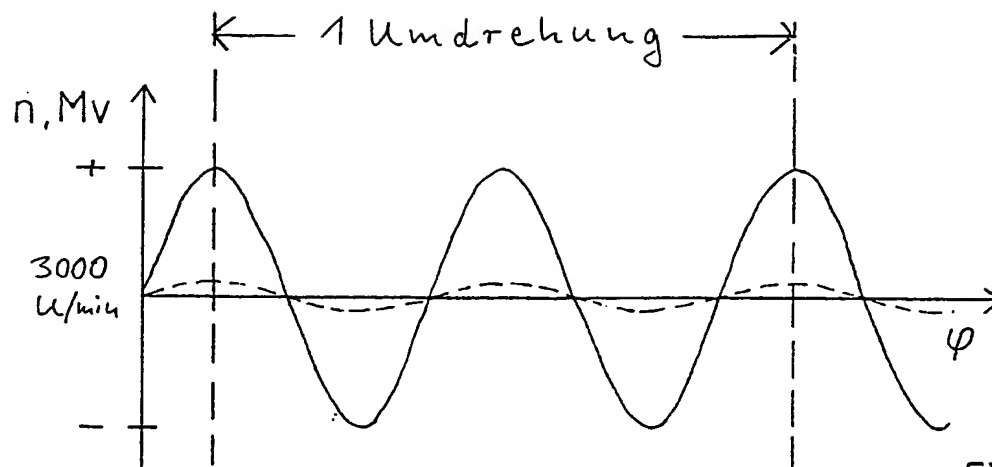
34. Verfahren zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten einer Welle, insbesondere der Triebwelle (10) eines Verbrennungsmotors (1), mit wenigstens einer elektrischen Maschine (4), insbesondere einer Dreh- oder Wanderfeldmaschine, die mit der Welle gekoppelt oder koppelbar ist, wenigstens einem Wechselrichter (17) zum Erzeugen der für die magnetischen Felder der Maschine (4) benötigten Spannungen und/oder Ströme variabler Frequenz, Amplitude und/oder Phase, wobei bei dem Verfahren durch eine Steuereinrichtung (31) der Wechselrichter (17) und damit die elektrische Maschine (4) so gesteuert wird, daß diese positiven und negativen Drehungleichförmigkeiten der Welle entgegenwirkt.

35. Verfahren nach Anspruch 34, bei welchem ein System zur aktiven Verringerung von Drehungleichförmigkeiten nach einem der Ansprüche 1—33 verwendet wird.

Hierzu 11 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**





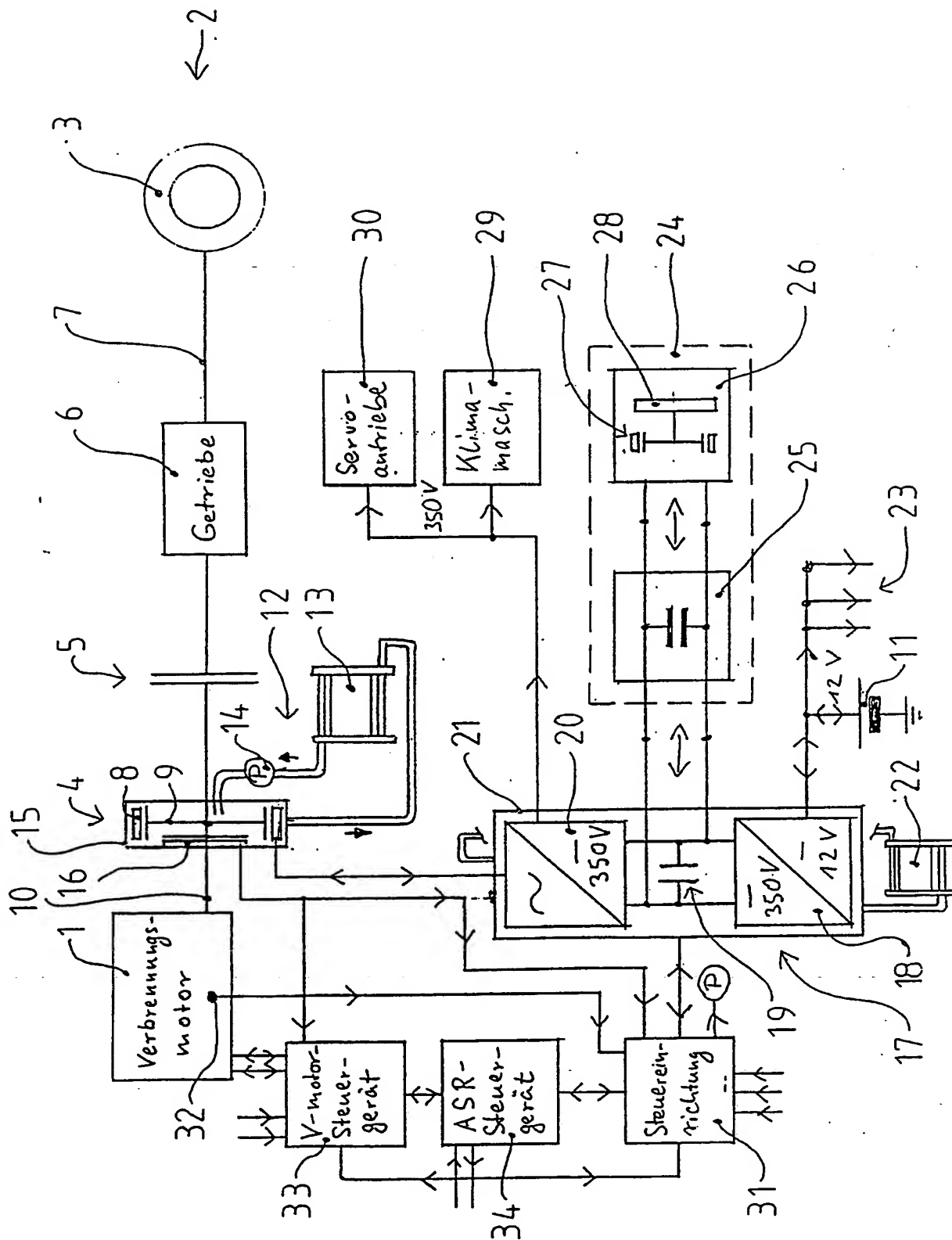


Fig. 2

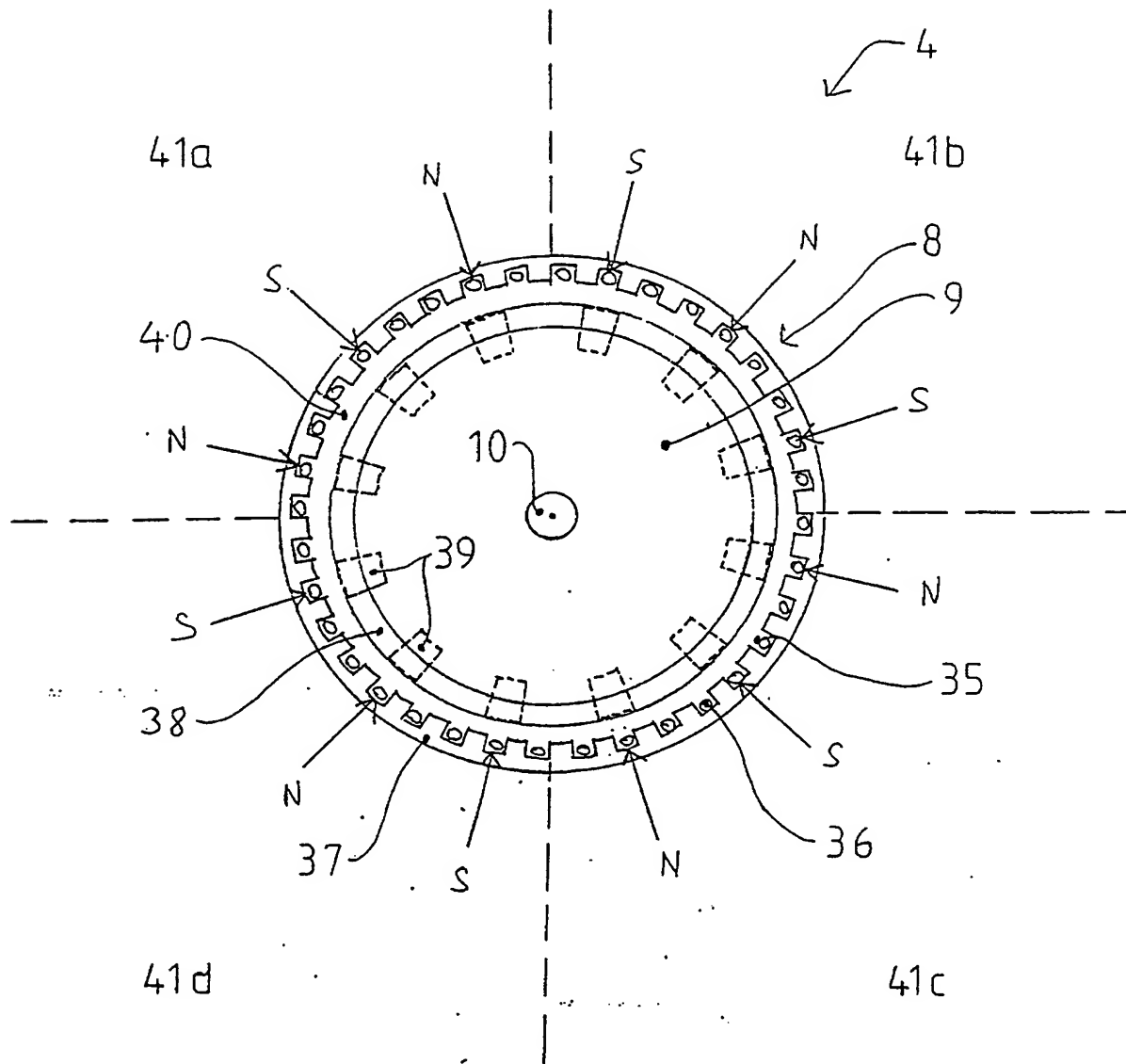


Fig. 3

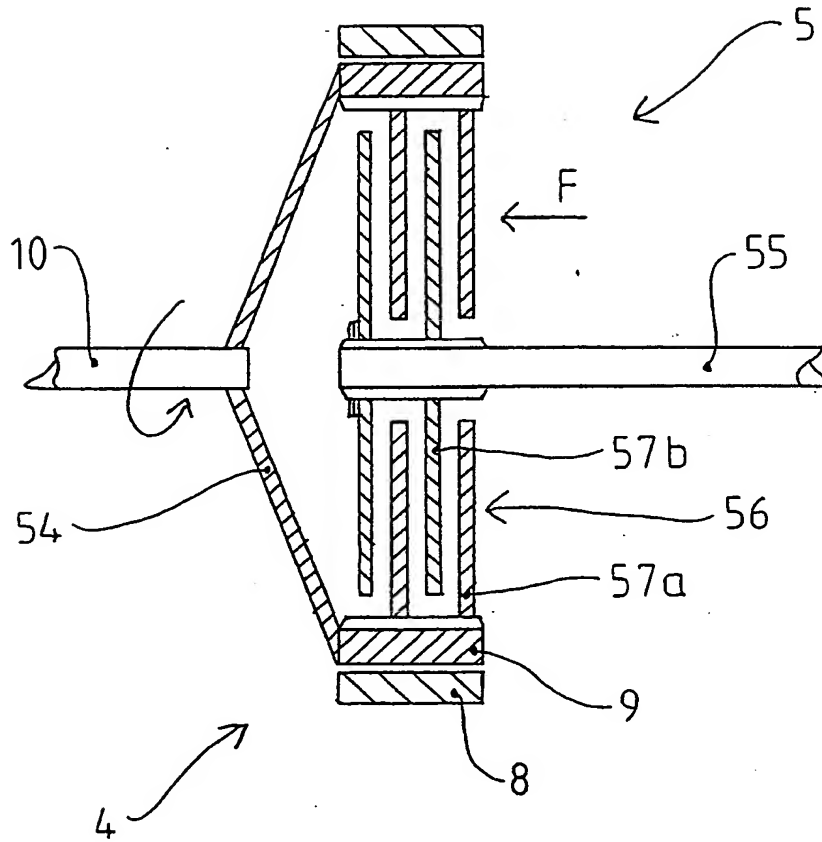


Fig. 4

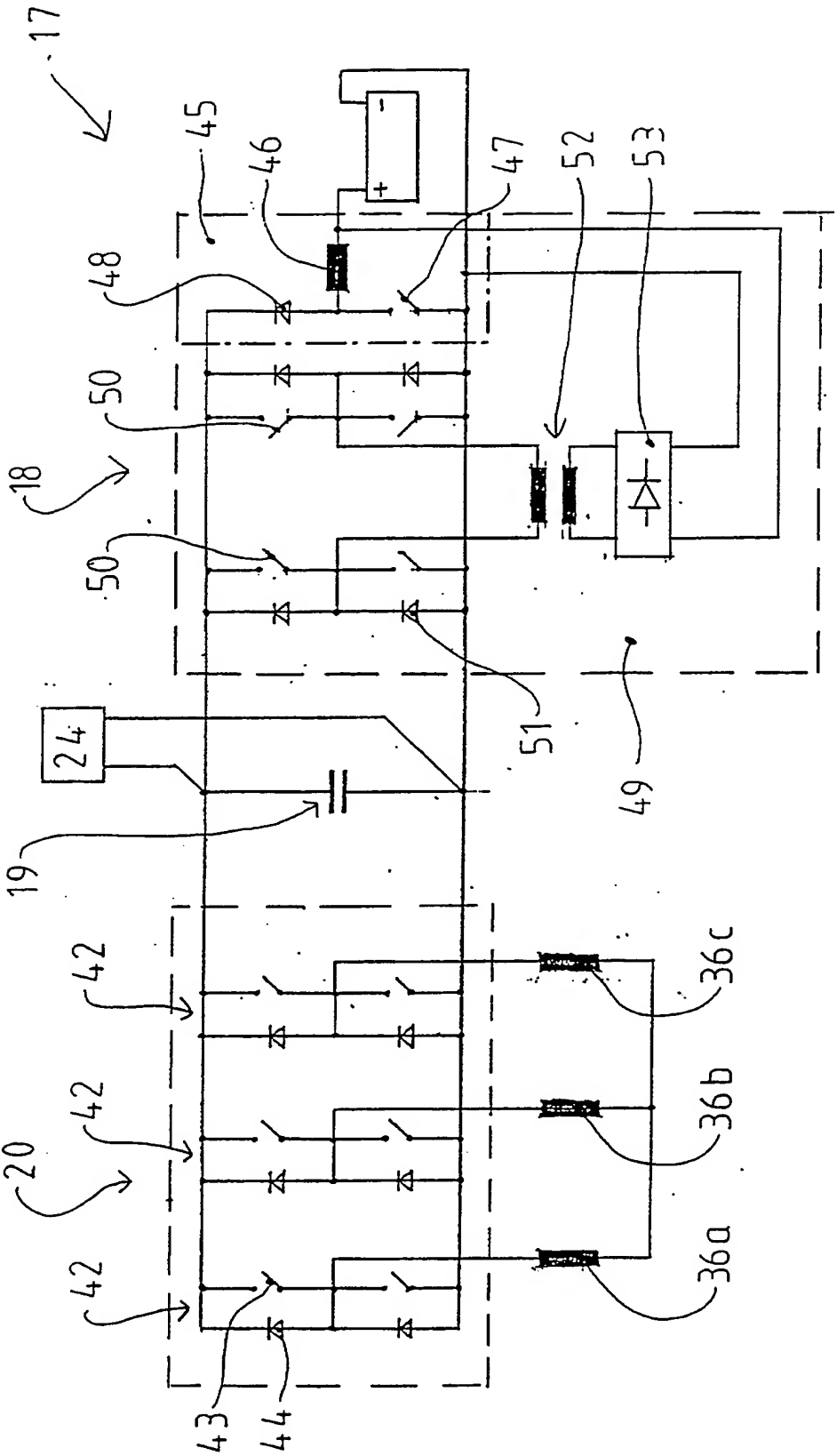


Fig. 5

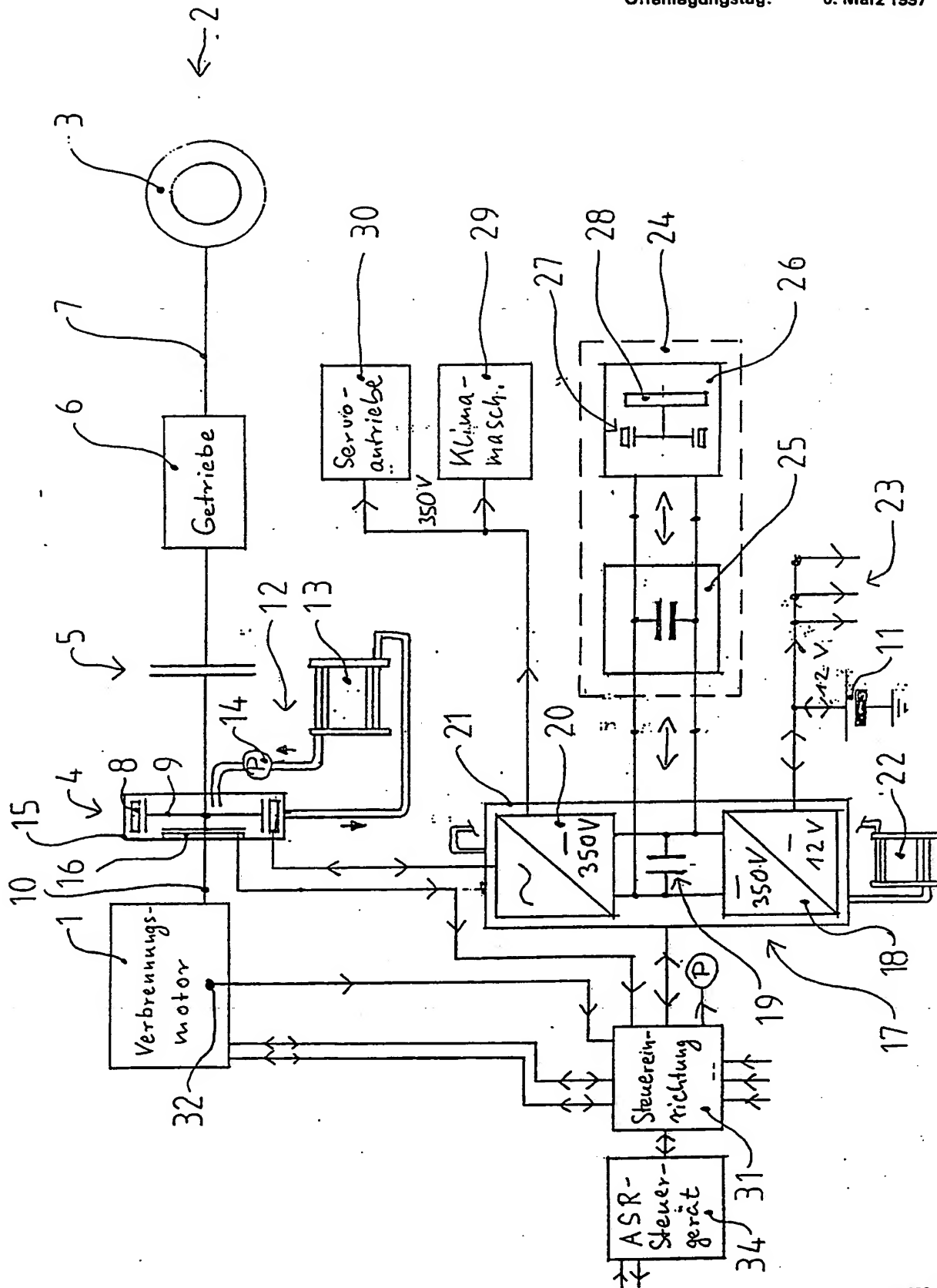


Fig. 6



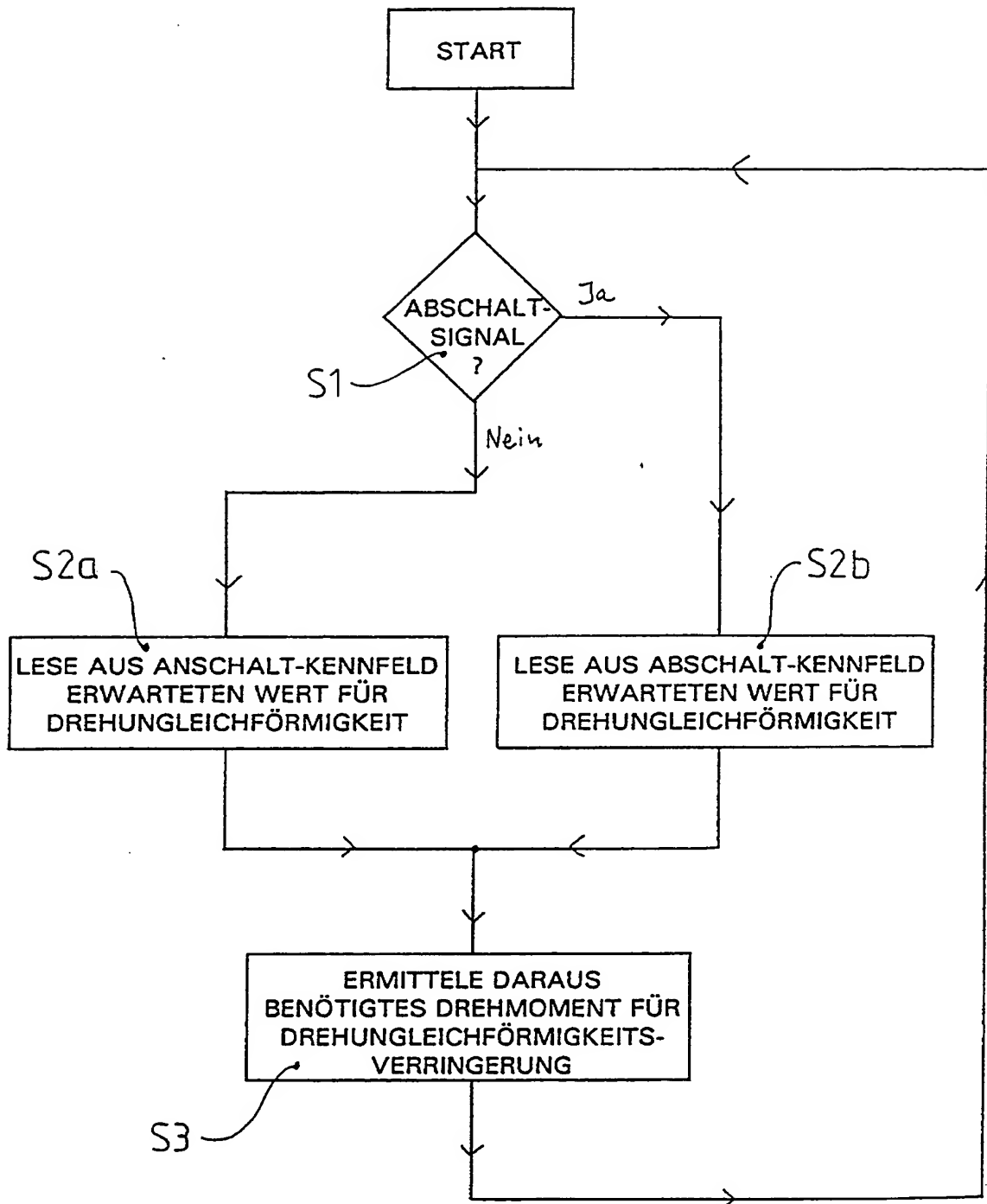
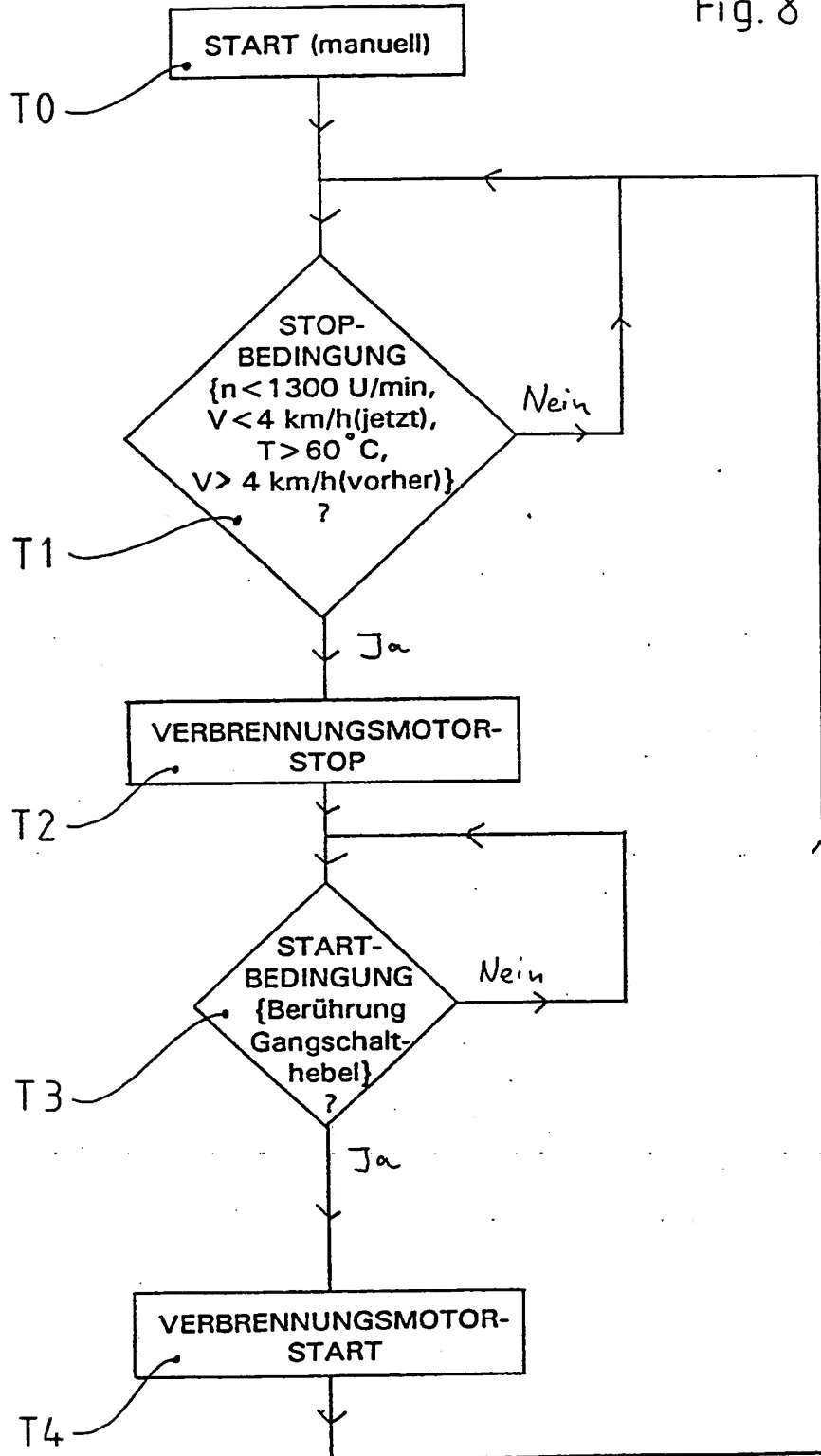
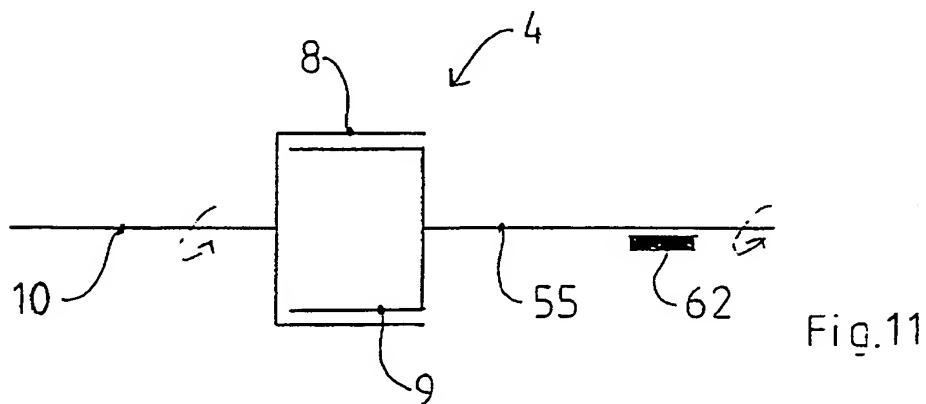
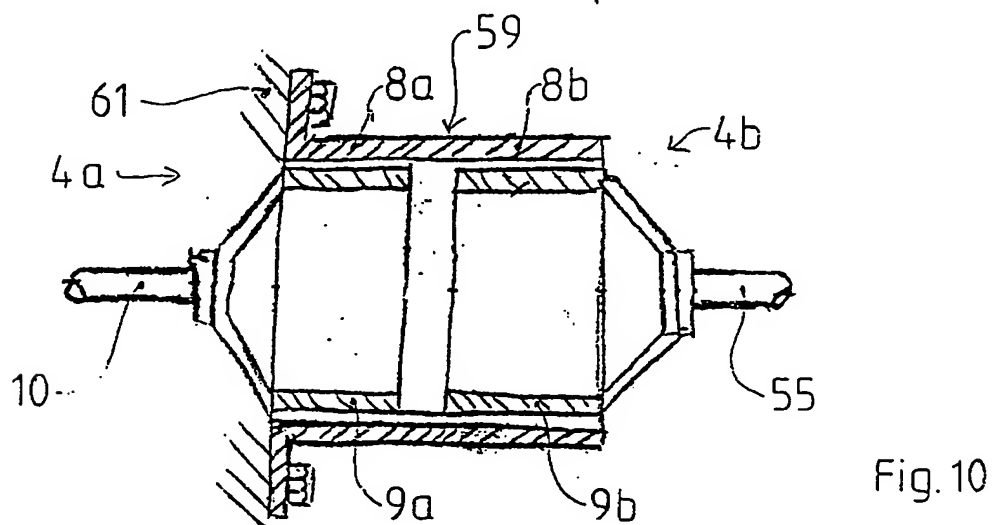
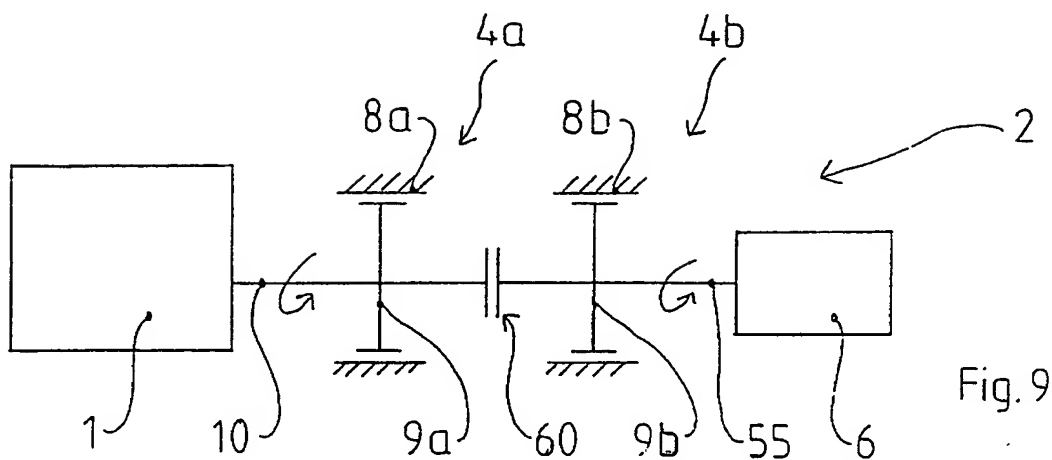


Fig. 7

Fig. 8





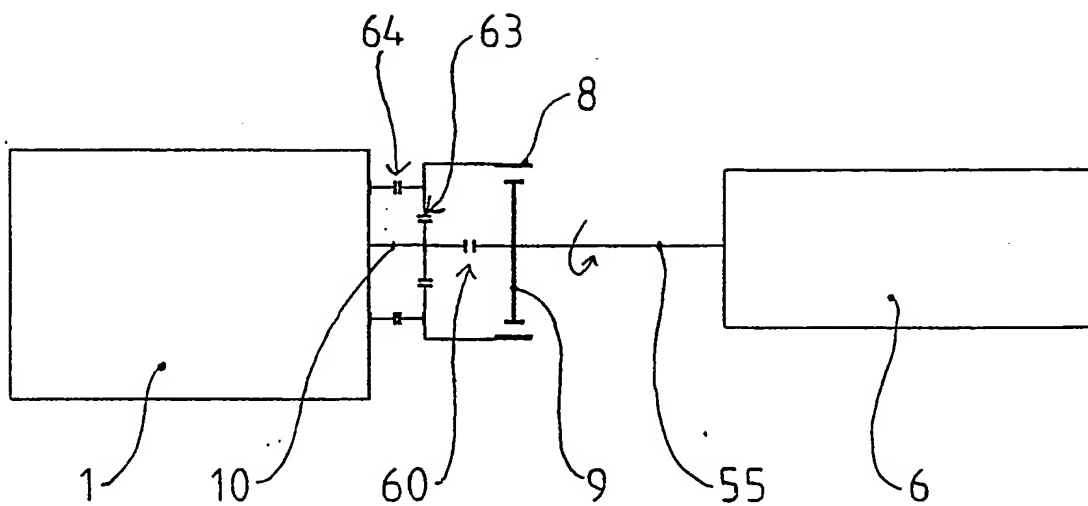


Fig. 12

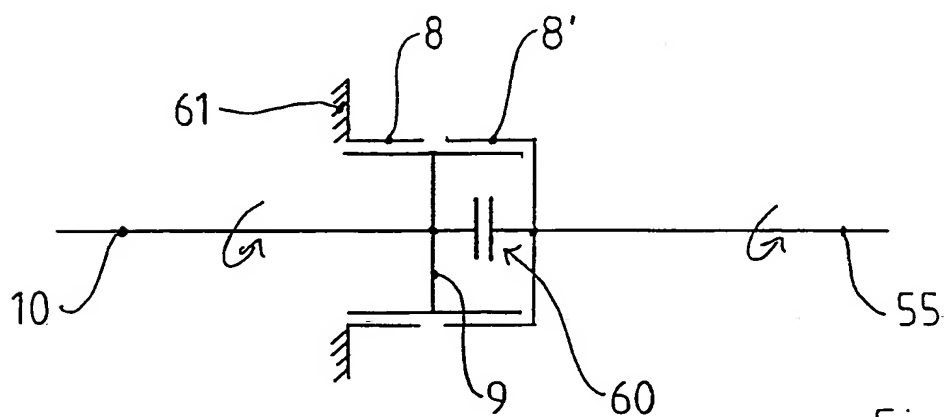


Fig. 13

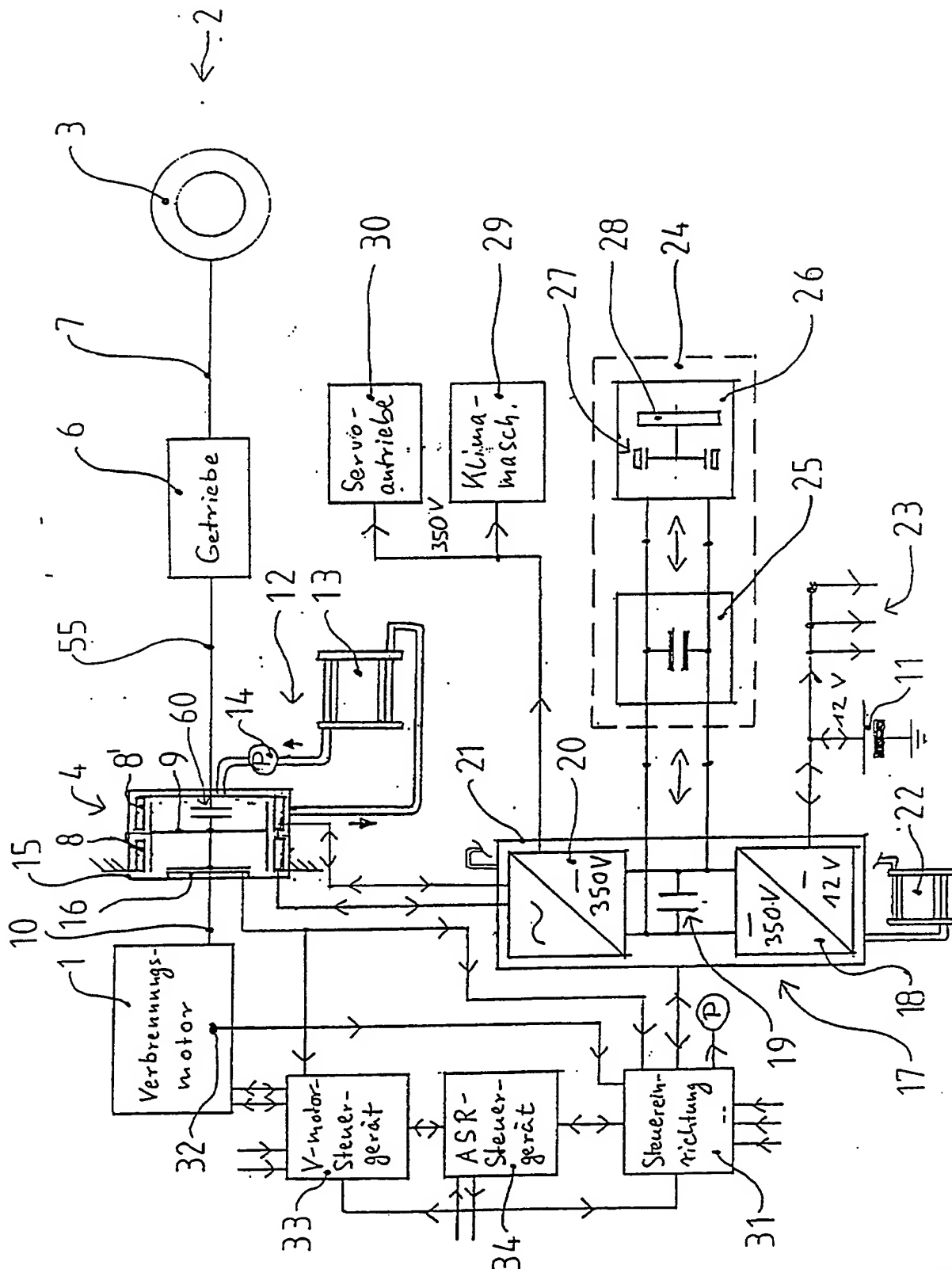


Fig. 14



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**